



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

Modélisations hydrogéologiques numériques de l'aquifère karstique de Thau

Rapport final

BRGM/RP-71757-FR

Version 1 du 30 septembre 2022

Étude réalisée dans le cadre des projets de recherche

Hakoun V., Ladouche B. avec la collaboration de Manceau J-C.

Vérificateur :	
Nom :	J.-C. Maréchal
Fonction :	Responsable de l'unité Nouvelles Ressources en Eau
Date :	20/10/2022
Signature :	

Approbateur :	
Nom :	P. Pannet
Fonction :	Directeur adjoint DAT
Date :	22/12/2022
Signature :	

Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr



PROJET COFINANCÉ PAR LE FONDS EUROPÉEN DE DÉVELOPPEMENT RÉGIONAL



Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu.

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctq> ou par ce code :



Mots clés : Eaux souterraines, Modélisation numérique, Modèle global, GARDENIA, MARTHE, Balaruc-les-Bains, Hydrosystème de Thau, Hérault

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Hakoun V., Ladouche B. avec la collaboration de Manceau J-C. (2022) – Modélisations hydrogéologiques numériques de l'aquifère karstique de Thau. Rapport final. BRGM/RP-71757-FR, 111 p., 47 fig., 6 ann.

© BRGM, 2022, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
IM003-MT008-P2-20/01/2022

Synthèse

Le projet de recherche DEM'Eaux Thau, débuté en 2017 et piloté par le BRGM, vise à mieux comprendre la structure et le fonctionnement de l'hydrosystème du Bassin de Thau (Hérault) afin de développer un outil de gestion des eaux souterraines. Ce travail pluridisciplinaire a été divisé en trois volets : (1) le volet géologie, piloté par Géosciences Montpellier et réalisé en collaboration avec le BRGM, (2) le volet hydrogéologie, piloté par le BRGM et réalisé en collaboration avec Hydrosociences Montpellier et Synapse et (3) le volet géochimie piloté par Hydrosociences Montpellier et réalisé en collaboration avec le BRGM.

Le présent rapport constitue le livrable L11 A du projet. Il présente les résultats des modélisations numériques réalisées pour quantifier les flux et les chemins d'écoulement au sein de l'aquifère karstique qui alimente la source de la Vise de l'étang de Thau. Ce travail de modélisation s'appuie sur les nombreuses données (géologie, variables hydrogéologiques) compilées dans le projet et décrites dans l'ensemble des autres livrables (p. ex. pour la Vise : Lamotte (2019) et Ladouche *et al.* (2022) pour l'équipement et les données en période d'inversac). Pour réaliser ces modélisations, deux approches complémentaires sont utilisées. La première est basée sur une approche conceptuelle (GARDENIA) qui permet de proposer des grandeurs de flux de recharge et d'écoulements au sein et hors de l'aquifère (sources). L'autre est basée sur une approche à base physique, avec l'outil de modélisation MARTHE, qui permet de proposer des champs de propriétés hydrodynamiques hétérogènes, des calculs locaux des flux et des chemins d'écoulements au sein de l'aquifère, en tenant compte des évolutions des prélèvements et de la recharge.

L'approche de modélisation globale (conceptuelle) permet de qualifier le fonctionnement hydrogéologique du système karstique, et d'établir un bilan hydrogéologique aux échelles de deux compartiments « amont » et « aval ». Le fonctionnement hydrogéologique montre que la source d'Issanka est l'exutoire principal du compartiment amont de l'aquifère, depuis cette source s'écoule la Vène. L'impluvium de recharge pour ce compartiment est situé sur le causse d'Aumelas et la montagne de la Moure. Les sources temporaires de la Vène (à Courdensec) et des Oulettes (à Montbazin) s'activent, tels des trop pleins du système karstique, suite aux épisodes pluvieux majeurs (>100 mm). L'impluvium de la station hydrologique situé à l'aval d'Issanka qui a été utilisée pour la naturalisation des écoulements est de 135,6 km². La part des écoulements souterrains qui n'émergent par à Issanka sont transférés vers un compartiment aval, dont l'exutoire principal est la source de la Vise. L'impluvium associé à ce compartiment est de 20,6 km².

Du point de vue quantitatif, le modèle conceptuel (outil GARDENIA) apporte des ordres de grandeur des flux concernant ces compartiments amont et aval. La recharge sur le causse d'Aumelas et la montagne de la Moure du compartiment amont a été évaluée à 152,8 mm/a en moyenne [7,5 millions de m³/a] ; les flux du karst qui alimentent la Vène représente en moyenne 130,6 mm/a [6,4 millions de m³/a], le flux d'échange au profit du compartiment aval est évalué à 22,3 mm/a [1,1 millions de m³/a]. Une forte corrélation identifiée entre l'évolution temporelle du flux d'échange au profit du compartiment aval et la piézométrie mesurée aux ouvrages CGE-Tennis (BSS002JEHM) et P4-La Balm (BSS002JEKE) confirme le lien hydraulique entre les deux compartiments. Les flux de l'amont vers l'aval sont estimés à 150 l/s en hautes eaux et <30 l/s en période de très basses eaux. A l'aval, le flux de recharge moyen est évalué entre 131-141 mm.an⁻¹ ; et le flux moyen de la Vise est de l'ordre de 0,127 m³/s (4 millions de m³/a), la variabilité interannuelle apparait assez faible (Min= 0,1 m³/s, Max =0,15 m³/s) soit entre 3,2 et 4,8 millions de m³/a. En moyenne, le flux en provenance du compartiment amont représenterait environ 30 % du flux total de la Vise. Les flux des exutoires secondaires du compartiment aval (sources de Cauvy et d'Ambressac), représenteraient moins de 10 % des flux moyens de la source de la Vise.

La conversion du modèle géologique 3D (Hemelsdael *et al.*, 2021) vers une géométrie des couches aquifères fonctionnelles dans l'outil de modélisation MARTHE a constitué un élément de base très important de ce travail. Le modèle MARTHE constitué de plus de 12 200 mailles de 400 m de côté prend en compte les nouvelles informations géologiques, en particulier les profondeurs des couches et la faille de Thau, dans les simulations d'écoulements. L'approche numérique de type milieu poreux équivalent s'est révélée satisfaisante pour reproduire les charges à l'échelle régionale comparable aux états de référence observés dans le karst. La modélisation permet en outre de reproduire localement les débordements correspondant aux sources et les dynamiques de fonctionnement observées, ainsi que les flux ascendants correspondant à des différences de charges verticales observées entre des horizons peu profonds (100-200 m) et profonds (700 m) du Jurassique (e.g. différences de charges entre les ouvrages DemT1 et DemT4 de la plateforme expérimentale).

Les calculs inverses de trajectoires ont permis d'identifier les principaux chemins d'écoulement vers la source de la Vise. Les calculs montrent qu'à partir d'une origine commune (Causse d'Aumelas), deux groupes d'écoulements s'individualisent puis convergent vers la source sous-marine de la Vise. Le premier traverse la partie méridionale du territoire (depuis la partie sud du causse d'Aumelas en passant par i) le flanc est de la montagne de la Moure ou ii) le trop-plein de la Vène puis par Issanka et la Vise. L'autre traverse la montagne de la Moure et converge vers la Vise après un passage en profondeur sous le bassin de Villeveyrac et sous l'étang de Thau. Les résultats de modélisation permettent d'illustrer le rôle joué par la faille de Thau dans l'organisation des écoulements profonds.

Sommaire

1. Introduction	11
2. Contexte hydrogéologique de la zone d'étude et réseau d'observation	13
2.1. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE	13
2.2. COMPARTIMENT AMONT : DONNÉES SUR LE SYSTÈME VÈNE (TROP-PLEIN) - ISSANKA	16
2.2.1. Relation Débit gravitaire (AEP) versus Piézométrie-Issanka.....	18
2.2.2. Relation débit moyen journalier du trop-plein de la Vène versus piézométrie dans le karst (BSS002JDBC)	19
2.2.3. Caractérisation des flux issus du compartiment amont de l'entité A.V.I.C. contribuant à la Vène	19
2.3. COMPARTIMENT AVAL : DONNÉES SUR LES DÉBITS DES SOURCES (VISE, CAUVY, AMBRESSAC) ET LA PIÉZOMÉTRIE AU SEIN DE LA PRESQU'ÎLE DE BALARUC	21
2.3.1. Chroniques piézométriques.....	21
2.3.2. Source de la Vise	22
2.3.3. Source de Cauvy.....	23
2.3.4. Source d'Ambressac	25
3. Modèle global avec l'outil GARDENIA	27
3.1. PRÉSENTATION DE L'APPROCHE DE MODÉLISATION AVEC GARDENIA.....	27
3.2. MODÉLISATION DES FLUX ISSUS DU COMPARTIMENT KARSTIQUE AMONT DE L'ENTITÉ A.V.I.C.....	30
3.2.1. Schéma conceptuel de modélisation adopté pour décrire le fonctionnement hydrogéologique.....	31
3.2.2. Données utilisées pour la modélisation	32
3.2.3. Stratégie de calibration.....	32
3.2.4. Résultats	34
3.3. MODÉLISATION DES FLUX DE LA VISE (COMPARTIMENT AVAL DE L'ENTITÉ A.V.I.C.).....	37
3.3.1. Schéma conceptuel.....	37
3.3.2. Données utilisées pour la modélisation	37
3.3.3. Stratégie de calibration.....	38
3.3.4. Résultats	38
3.4. MODÉLISATION DES FLUX DES EXUTOIRES SECONDAIRES (CAUVY, AMBRESSAC).....	40
3.4.1. Schéma conceptuel, données utilisées et stratégie de calibration	40
3.4.2. Résultats	40
3.5. SYNTHÈSE	41

4. Modèle déterministe avec l'outil MARTHE	43
4.1. PRÉSENTATION DE L'APPROCHE DE MODÉLISATION DÉTERMINISTE	43
4.2. IMPORTATION DU MODÈLE GÉOLOGIQUE	44
4.3. DOMAINE DE MODÉLISATION, CONDITIONS AUX LIMITES, RECHARGE ET PRÉLÈVEMENTS	48
4.3.1. Étendue du domaine de modélisation	48
4.3.2. Conditions aux limites	49
4.3.3. Recharge	50
4.3.4. Représentation du réseau hydrographique	52
4.3.5. Prélèvements	52
4.4. RÉGIME PERMANENT	56
4.4.1. Méthode	56
4.4.2. Résultats	56
4.5. RÉGIME TRANSITOIRE	58
4.5.1. Méthode	58
4.5.2. Résultats	58
4.6. IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE À L'HORIZON 2100	64
4.6.1. Méthode	64
4.6.2. Résultats	65
4.7. SYNTHÈSE ET PERSPECTIVES	70
4.7.1. Synthèse	70
4.7.2. Mise en perspectives des résultats	71
4.7.3. Perspectives de modélisation	71
5. Conclusion	73
6. Bibliographie	75

Liste des figures

Figure 1 : Carte de localisation de la zone d'étude	14
Figure 2 : Coupe géologique interprétative nord-sud de la zone d'étude.	15
Figure 3 : Coupe hydrogéologique interprétative révisée (projet DEM'EAUX Thau).	15
Figure 4 : Évolution de la piézométrie du champ captant d'Issanka (depuis 2017) et évolution des débits gravitaires prélevés pour l'AEP et des débits pompés pour le débit réservé de la Vène	17
Figure 5 : Relation débit gravitaire versus piézométrie dans le karst mesuré au niveau d'Issanka.	18
Figure 6 : Relation débit moyen journalier du trop-plein de la Vène versus piézométrie dans le karst (BSS002JDBC).	19
Figure 7 : Évolution de la piézométrie à Issanka (2013-2015) et des débits gravitaires prélevés au captage. Les débits mesurés sur la Vène à l'aval d'Issanka (station aval HSM) permettent de connaître les flux issus du compartiment amont de l'entité A.V.I.C. contribuant à la Vène. La somme des débits mesurés (VGlobal) permet d'accéder à l'hydrogramme « naturalisé » de l'hydrosystème.	20
Figure 8 : Évolution des flux karstiques issus du compartiment amont de l'entité A.V.I.C. contribuant à la Vène (période 2005-2020).	20
Figure 9 : Évolution piézométrique de la piézométrie au sein du compartiment aval de l'entité A.V.I.C. depuis juin 2017 et comparaison aux mesures réalisées à Issanka.	21
Figure 10 : Situation de la source sous-marine de la Vise à Balaruc-les-Bains.	22
Figure 11 : Suivis réalisés à la source de la Vise depuis juillet 2019.	23
Figure 12 : Évolution de la piézométrie mesurée à la source de Cauvy. Les débits de prélèvement AEP ainsi que les débits estimés de la source sont également reportés.	24
Figure 13 : Schéma de modélisation adopté pour décrire le fonctionnement des sources karstiques.	28
Figure 14 : Délimitation de l'impluvium à la station hydrométrique aval de la Vène (compartiment karstique amont de l'entité A.V.I.C.).	30
Figure 15 : Schéma conceptuel de modélisation adopté pour décrire le fonctionnement du compartiment karstique amont de l'entité A.V.I.C.	31
Figure 16 : Paramètres du modèle après calibration (compartiment karstique amont de l'entité A.V.I.C.).	33
Figure 17 : Évolution des débits (observation/simulation) et des hauteurs d'eau (observation/simulation), modèle GARDENIA (compartiment karstique amont de l'entité A.V.I.C.).	34
Figure 18 : Bilan moyen du modèle, période 2000-2020 (compartiment karstique amont de l'entité A.V.I.C.).	35
Figure 19 : Comparaison des flux d'échange entre le compartiment amont et aval de l'entité A.V.I.C. à la piézométrie mesurée au sein de la presqu'île de Balaruc (compartiment aval).	36
Figure 20 : Bilan hydrogéologique du compartiment amont de l'entité A.V.I.C.	36
Figure 21 : Délimitation de l'impluvium karstique du compartiment aval de l'entité A.V.I.C.	37
Figure 22 : Évolution des débits observés et simulés par les modèles GARDENIA « Vise ».	39
Figure 23 : Paramètres et critères d'ajustement du modèle Vise.	39
Figure 24 : Bilan hydrogéologique du système karstique de l'entité A.V.I.C.	42
Figure 25 : Aperçu des données et paramètres utilisées lors d'une modélisation avec l'outil MARTHE (Thiéry, 1990).	43

Figure 26 : Coupe géologique illustrant les différentes couches retenues dans le modèle géologique 3D (Hemelsdael et al., 2021). Le nouveau modèle présente une nouvelle faille chevauchante au niveau de Thau qui sépare des compartiments « amont », vers le nord et « aval » vers le sud.	44
Figure 27 : Log-lithostratigraphique utilisé dans le modèle géologique 3D et détails des couches associées et regroupées dans le modèle distribué MARTHAU.	45
Figure 28 : Représentation de la profondeur du substratum sur la couche 8 (Jurassique Supérieur, partie amont de la faille de Thau) du modèle MARTHE. Les croix rouges indiquent les principales sources du territoire. Les lignes grises indiquent les accidents tectoniques régionaux.	47
Figure 29 : Vue d'ensemble 3D du modèle hydrogéologique de l'aquifère associé à la source de la Vise.	48
Figure 30 : Carte des trois zones de recharge considérées dans le modèle d'écoulement distribué : Zone 1 en jaune au nord, Zone 2 en orange au sud et Zone 3 en rose à l'est. Les croix rouges indiquent les principales sources de l'hydrosystème.	50
Figure 31 : Cumuls de recharge annuelle appliqués sur les surfaces affleurantes des calcaires du Jurassique dans le modèle d'écoulement distribué.	51
Figure 32 : Aperçu des principaux points de prélèvements considérés dans le modèle MARTHE pour les simulations en régime transitoire (1990-2021). Fond de carte Google.	53
Figure 33 : Évolution des prélèvements à Villeveyrac (BSS002JCLT), exhaure minier et usages agricoles.	54
Figure 34 : Comparaison des évolutions des a) cumuls des prélèvements dans l'aquifère karstique associé aux couches du Jurassique Supérieur et Moyen dans l'emprise du modèle distribué, b) cumuls des prélèvements dans l'emprise de l'entité hydrogéologique A.V.I.C. etc) des fractions associés aux cumuls A.V.I.C. vis-à-vis de l'aquifère karstique dans sa globalité.	55
Figure 35 : Comparaisons entre valeurs de piézométrie observées et calculées après calibration en régime permanent pour la situation d'été (août-septembre) de 1986. a) comparaison des valeurs observées et calculées sur des sites interceptant le Jurassique Supérieur (vert) et le Jurassique Moyen (rouge). Les points nommés indiquent les sites où la différence entre les valeurs observées et calculées est supérieure à 24 m. b) comparaison entre piézométrie régionale interprétée en basses-eaux 1986 (en rouge) et calculée en régime permanent (en noir) dans la couche 8 (Jurassique Supérieur) du modèle MARTHE.	57
Figure 36 : Champ des perméabilités dans la couche 8 obtenu après calibrations en régime permanent et régime transitoire. Les croix rouges représentent les emplacements de principales sources temporaires et pérennes du territoire. Les lignes grises matérialisent les principales structures géologiques.	59
Figure 37 : États des charges calculées en régime transitoire en période de hautes (gauche) et basses eaux (droite) dans la couche 8 représentant la géométrie du Jurassique Supérieur dans le modèle MARTHE. Les calculs reproduisent (i) la géométrie régionale des écoulements dans l'aquifère et (ii) les modifications de géométrie d'écoulement au sein du chemin d'écoulement préférentiel entre le trop-plein de la Vène, Issanka et la Vise.	61
Figure 38 : Comparaison de la piézométrie observée et calculée au pas de temps mensuel sur la période 1988 - 2021 à Villeveyrac (10161X0156/P4). Les observations ont été échantillonnées à la date du calcul mensuel.	61
Figure 39 : Comparaison de la piézométrie observée et calculée au pas de temps mensuel sur la période 1988 - 2021 à Balaruc-le-Vieux (10166X0212/BV83 - CGE Tennis). Les observations ont été échantillonnées à la date du calcul mensuel.	62

Figure 40 : Comparaison des débits de la Vise observés (vert) et simulés en régime transitoire au pas de temps mensuel (rouge) par le modèle MARTHE dans le cadre du projet Dem'Eaux Thau.	62
Figure 41 : Exemples de trajectoires (noir) vers la source de la Vise dans la couche 8 (J. Sup.) du modèle MARTHE, le fond correspond aux perméabilités de la couche. Les calculs montrent deux groupes (à l'est sur et à l'ouest de la montagne de la Moure) qui contribuent à l'alimentation de la source.	63
Figure 42 : Aperçu des anomalies annuelles des pluies (abscisses) et températures (ordonnées) annuelles simulées par les différents modèles climatiques à l'horizon 2071-2100 selon la trajectoire d'émission RCP85. Dans ce travail nous avons retenu HadgME-ES/CCLm4 (triangle haut gauche) qui est le plus pessimiste (plus de chaleur, moins de précipitations) - partenarial DRIAS (Météo-France, IPSL, Cerfacs) et donnée retravaillée au BRGM dans le cadre du projet Explore 2 (coordination INRAE).....	65
Figure 43 : Comparaison des cumuls moyens mensuels de recharge issus du traitement des pluies et température des projections HadgME-ES/CCLm4 – RCP85 et appliquées au modèle MARTHE de l'entité A.V.I.C.. La comparaison montre la complexité de l'évolution temporelle de la recharge dans la région.	66
Figure 44 : Distribution des recharges moyennes en fonction des horizons temporels (période de référence 1981-2005) et de la saisonnalité hydrologique (BE : Basses Eaux – d'avril à octobre ; HE : Hautes Eaux - de novembre à mars).....	67
Figure 45 : Résultats de calcul du modèle MARTHE de l'entité A.V.I.C : évolution des distributions des débits de la Vise calculés à la date de fin de mois sous contrainte de recharge issue des projections HadgME-ES/CCLm4 – RCP85. Les calculs ne prennent en compte aucun prélèvements.....	68
Figure 46 : Distribution des débits de la Vise calculés au pas de temps mensuel (date en fin de mois) en fonction des horizons temporels (période de référence 1981-2005) et de la saisonnalité hydrologique (BE : Basses Eaux – d'avril à octobre ; HE : Hautes Eaux - de novembre à mars).	68
Figure 47 : Résultats de calcul du modèle MARTHE pour les évolutions des distributions des débits minimaux annuels de la Vise sous contraintes de recharges issues des projections HadgME-ES/CCLm4 – RCP85. Les calculs du modèle sont réalisés sans prélèvements.....	69

Liste des annexes

Annexe 1 : Détail sur le réseau d'observation	77
Annexe 2 : Éléments complémentaires de la modélisation GARDENIA	89
Annexe 3 : Statistiques des couches du modèle MARTHE	93
Annexe 4 : Sites et observations de références	99
Annexe 5 : Principaux prélèvements sur le territoire	105
Annexe 6 : Carte des perméabilités – couche 9.....	109

Liste des figures en Annexes

Figure A- 1 : Exemple d'informations disponibles au trop-plein de la Vène (Extrait COSUI 10 Janvier 2020).	79
Figure A- 2 : Exemple d'informations disponibles au champ captant d'Issanka (Extrait COSUI 10 Janvier 2020).	80
Figure A- 3 : Évolution des débits et de la piézométrie du trop-plein de la Vène, évolution du débit de la Vène à Poussan (aval Issanka) et débit des prélèvements AEP du champ captant d'Issanka. (Extrait COSUI 10 Janvier 2020).	81
Figure A- 4 : Évolution de la piézométrie mesurée sur les ouvrages de référence du compartiment aval (Extrait COSUI 10 Janvier 2020).....	82
Figure A- 5 : Évolution de la piézométrie mesurée sur les ouvrages de référence de la presqu'île de Balaruc située à moins de 400 m de la source sous-marine de la Vise (Compartiment Aval, Extrait COSUI 10 Janvier 2020).....	83
Figure A- 6 : Inter-comparaison de la piézométrie mesurée au sein du « compartiment aval » et comparaison au débit de la source sous-marine de la Vise et au niveau de la lagune de Thau, Extrait COSUI 10 Janvier 2020).	84
Figure A- 7 : Courbe de tarage de la source de Cauvy et évolutions des débits/hauteurs depuis 2016. 85	
Figure A- 8 : Source d'Ambressac, extrait de la fiche de recollement de la station (SMBT).....	86
Figure A- 9 : Courbe de tarage de la source de d'Ambressac et évolutions des débits/hauteurs depuis 2018.....	87
Figure A- 10 : Emprise des mailles Safran sur la zone d'étude.	88
Figure A- 11 : Résultats de simulation du modèle GARDENIA Vise_P4-LaBalm.....	91
Figure A- 12 : Résultats de simulation du modèle GARDENIA Vise_CGE-Tennis.....	91
Figure A- 13 : Résultats de simulation du modèle GARDENIA Cauvy.	92
Figure A- 14 : Résultats de simulation du modèle GARDENIA Ambressac.....	93
Figure A- 15 : Paramètres de modèle Cauvy et Ambressac.	93

1. Introduction

Les ressources en eau souterraine des calcaires karstiques du Pli Ouest de Montpellier (masse d'eau FRDG160) présentent un intérêt majeur pour le territoire, pour l'alimentation en eau potable (ville de Sète), mais également pour le développement économique, avec en particulier l'activité conchylicole et pêche au niveau de l'étang, ainsi que le thermalisme sur la presqu'île de Balaruc-les-Bains (1^{re} station thermale en France avec plus de 50 000 curistes en 2019) et l'irrigation. Dans l'entité A.V.I.C. (« Aumelas-Vène-Issanka-Cauvy »), ces calcaires correspondent à une zone de convergence entre différentes masses d'eau souterraines (eaux karstiques froides des Causses d'Aumelas et de la Gardiole, eaux d'origine marine et eaux thermales chaudes et minéralisées) à l'origine de conflits d'usage, de dégradation de la qualité et de problèmes de quantité d'eau. Ces différents réservoirs sont en interaction les uns avec les autres selon des processus complexes qui sont étudiés dans le cadre du projet DEM'Eaux Thau.

Le projet de recherche DEM'Eaux Thau, débuté en juillet 2017 d'une durée de 5 ans, a pour objectif de mieux comprendre la structure et le fonctionnement de l'hydrosystème complexe et vise à développer un outil de gestion des eaux souterraines à l'échelle régionale basé sur un modèle hydrogéologique 3D distribué (code Marthe). Ce projet scientifique pluridisciplinaire implique la caractérisation de la géologie, l'hydrogéologie et la géochimie de cet hydrosystème, sur un territoire soumis à : i) des enjeux économiques importants (croissance démographique, thermalisme, conchyliculture, pêche, tourisme) ; ii) la fragilité de l'équilibre entre les différentes ressources en eaux souterraines (comme les phénomènes d'intrusion d'eau marine) ; iii) la complexité du comportement des différents réservoirs. Ce projet rassemble le BRGM (coordinateur du projet - responsable des tâches hydrogéologie, modélisation hydrogéologique), Géosciences Montpellier (responsable de la tâche géologie/construction du modèle géologique), HydroSciences Montpellier (responsable de la tâche géochimie), l'entreprise Synapse Informatique (responsable de l'élaboration de l'outil de gestion) et le SMBT futur destinataire de l'outil de gestion des eaux souterraines de l'hydrosystème de Thau. Ce projet est financé par l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, l'Etat et la Région (CPER), l'Europe (FEDER), Montpellier Méditerranée Métropole, la ville de Balaruc-les-Bains, le SMBT ainsi que par les partenaires opérationnels.

Une meilleure gestion de la ressource en eau souterraine de l'entité hydrogéologique A.V.I.C. constitue l'un des verrous scientifiques du projet DEM'Eaux Thau. Cet objectif doit s'appuyer sur la compréhension détaillée du fonctionnement hydrogéologique de la zone d'étude (Figure 1) notamment dans le secteur de la presqu'île de Balaruc-les-Bains ce qui a nécessité la mise en place de l'équipement de la source sous-marine de la Vise (L7, BRGM/ RP-69163-FR) et le suivi des flux des sources de Cauvy et d'Ambressac (localisation en Figure 3). Ces suivis ont constitué le préalable à l'évaluation quantitative précise des bilans d'eau de cet hydrosystème complexe, et en particulier, l'évaluation des flux d'échange entre le compartiment « amont » et le compartiment « aval » (Figure 2). L'étude s'appuie sur l'important renforcement du réseau de mesure existant qui intègre notamment les données acquises sur le forage de Sète (BRGM/RP-68549-FR) et les plateformes expérimentales des forages (DemT1, DemT2) et de la Vise (cf. présentation des plateformes dans le rapport BRGM/RP-70842-FR qui constitue le livrable L10 du projet). Des approches de modélisation globale à l'aide du logiciel GARDENIA ont été mises en œuvre pour caractériser le fonctionnement de l'aquifère et réaliser des premiers bilans hydrogéologiques. Des approches de modélisation distribuée 3D (MARTHE) ont été développées dans un second temps afin de cerner les possibilités de modélisation à l'échelle régionale et d'obtenir des informations complémentaires sur les chemins d'écoulement vers la source de la Vise et sur l'impact des changements climatiques (par le biais d'une modification de la recharge) jusqu'à l'horizon 2100. L'élaboration du maillage 3D hydrodynamique s'appuie sur les contraintes géométriques complexes du modèle géologique 3D élaboré dans le cadre du projet (L4 ; BRGM/RP-70789-FR).

Le présent rapport constitue le livrable L11A du projet Dem'Eaux Thau. Il est constitué de trois grandes sections : le contexte hydrogéologique de la zone ainsi que le réseau d'observation sont présentés dans le chapitre 2, les résultats de l'approche de modélisation conceptuelle sont présentés au chapitre 3 et ceux de l'approche de modélisation physique avec un modèle distribué sont présentés au chapitre 4. Les principaux résultats et les perspectives de ce rapport sont résumés au dernier chapitre 5.

2. Contexte hydrogéologique de la zone d'étude et réseau d'observation

2.1. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

L'hydrosystème de Thau est situé au sud-ouest de Montpellier, dans la région Occitanie. Cette étude concerne la masse d'eau FRDG160 « Calcaires jurassiques du pli ouest de Montpellier et formations tertiaires, unité Thau Montbazin - Gigean Gardiole » et plus spécifiquement l'entité A.V.I.C. (« Aumelas-Vène-Issanka-Cauvy » et « Gardiole Est ») dans le projet de SDAGE 2016-2021 ((**Vigouroux et al.**, 2008)). Géographiquement, la zone d'étude est délimitée par le Causse d'Aumelas au nord, le massif de la Gardiole au nord-est, la vallée de l'Hérault à l'ouest et l'étang de Thau et plus généralement la bordure littorale au sud (Figure 1).

Le contexte hydrogéologique et le schéma conceptuel de structure et de fonctionnement de la zone d'étude ont été présentés dans le rapport BRGM/RP-68483-FR sur la base de la synthèse des connaissances existantes. Retenons que le Jurassique Supérieur, fortement faillé et karstifié, constitue le siège des principaux aquifères karstiques de la zone d'étude. Il affleure largement dans l'arrière-pays, sur le Causse d'Aumelas et la montagne de la Moure, sur le massif de la Gardiole et sur les pointements que l'on retrouve au niveau de la presqu'île de Balaruc ainsi que sur le Mont Saint-Clair à Sète (Figure 2). Ces massifs constituent une zone de recharge des aquifères par les précipitations. Les failles principales correspondent au chevauchement de Montpellier (nord du secteur) et à la faille normale de Nîmes (sud du secteur). Les accidents majeurs d'orientation nord-nord-est/sud-sud-ouest sont accompagnés d'accidents secondaires globalement orthogonaux. Les accidents chevauchants profonds pourraient constituer des vecteurs préférentiels pour la remontée des eaux thermales vers la surface. Il est supposé que le pendage de ces accidents diminue avec la profondeur. **La valorisation des données géologiques a permis de mettre en évidence la présence d'un chevauchement (nommé Faille de Thau) d'axe est-ouest et situé sous l'étang de Thau (Hemelsdael et al., 2021).** Cet accident correspondrait au prolongement du chevauchement traversé par le forage pétrolier de Valensac dans la vallée de l'Hérault.

L'écoulement général de l'aquifère au sein des calcaires jurassiques s'organise selon une direction nord-ouest/sud-est (Figure 1 et Figure 2). Un axe de drainage, démontré par essais de traçages, apparaît entre la source de trop-plein de la Vène et la source d'Issanka, l'étude détaillée des relations hydrauliques pour différentes conditions hydrogéologiques est présentée dans le livrable L8 (BRGM/RP-71758-FR). Il est noté que les directions d'écoulement générales mises en évidence sur les différentes cartes piézométriques ne varient pas en fonction des conditions hydrologiques (BRGM/RP-68483-FR). L'existence des pertes du Coulazou dont le bassin versant s'étend au-delà de la limite de la masse d'eau implique la prise en compte du bassin versant amont du Coulazou dans la délimitation de l'impluvium karstique de « Aumelas-Vène-Issanka-Cauvy » estimé à 200 km². Ces pertes ont lieu au sein des calcaires jurassiques entre la limite nord de l'entité (chevauchement de Montpellier) et l'entrée du cours d'eau sur la molasse miocène. L'émergence temporaire de la Vène et des Oulettes (trop-pleins) et plus au sud, les sources d'Issanka et, plus en aval encore, la source sous-marine de la Vise constituent les principaux exutoires de cette entité karstique « Aumelas-Vène-Issanka-Cauvy ». La partie occidentale du massif de la Gardiole entre Gigean et Frontignan est drainée principalement vers la source Cauvy et la source d'Ambressac à Balaruc-les-Bains et également par la source sous-marine de la Vise.

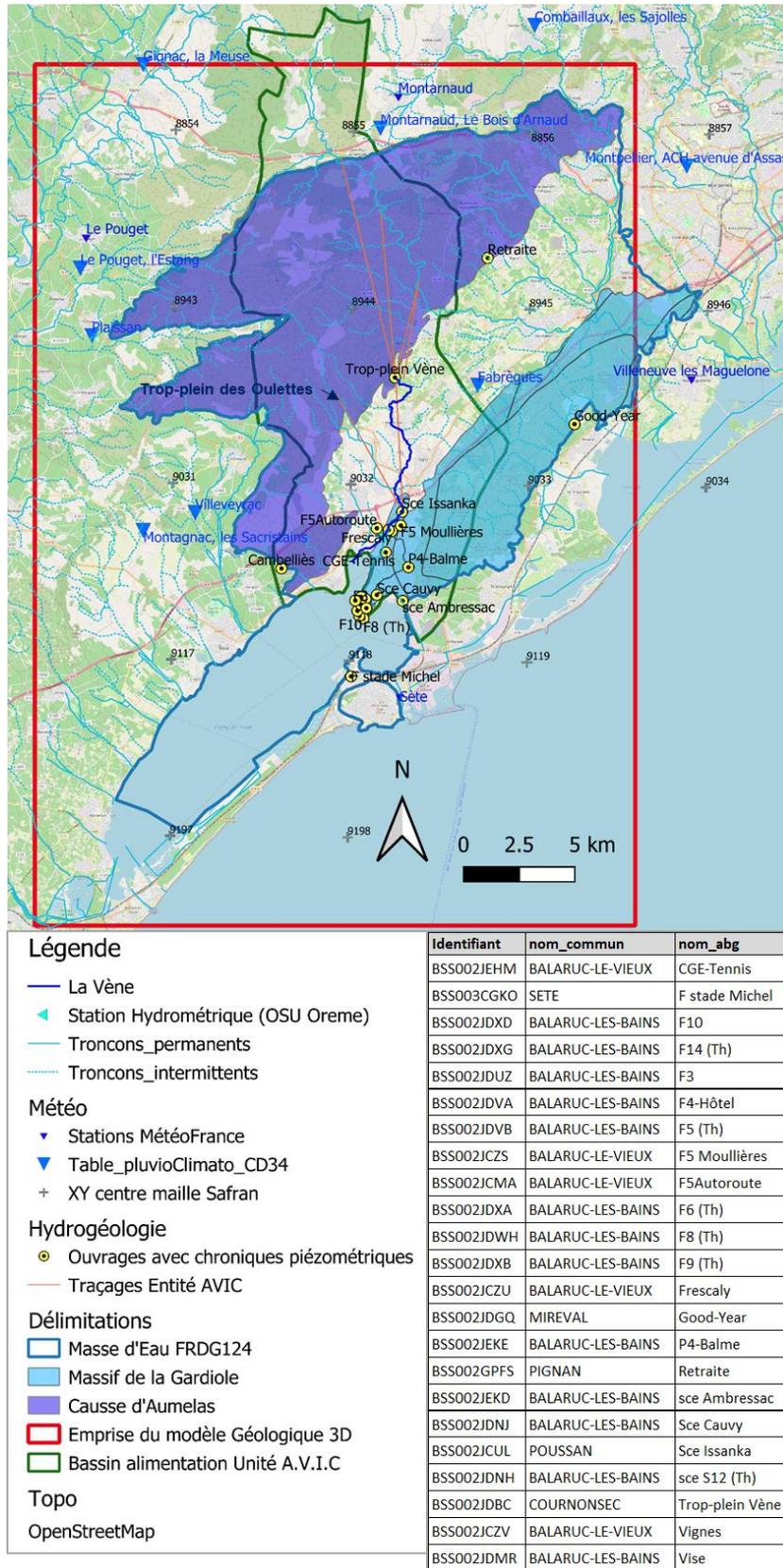


Figure 1 : Carte de localisation de la zone d'étude.

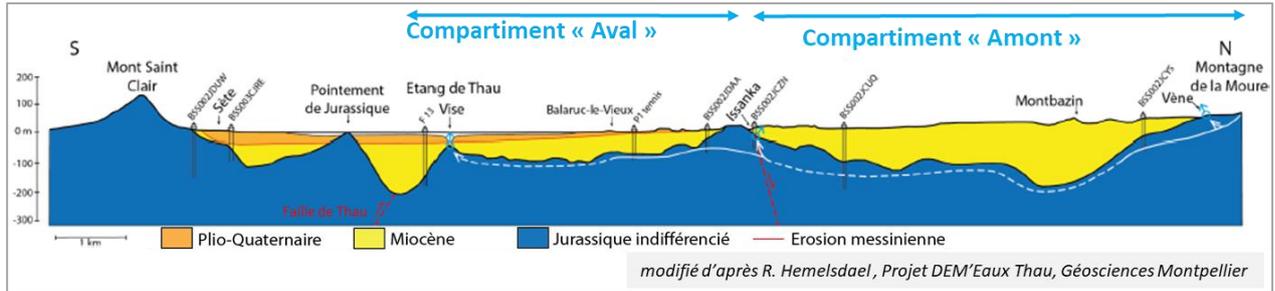


Figure 2 : Coupe géologique interprétative nord-sud de la zone d'étude.

La presqu'île de Balaruc constitue le lieu de convergence des eaux souterraines provenant de divers réservoirs superficiels et profonds: eaux karstiques froides des Causses d'Aumelas et de la Gardiole, eaux d'origine marine (étang et mer) et eaux thermales chaudes et minéralisées. En contexte de fonctionnement dit « normal » (hors inversac), la source de la Vise est l'exutoire le plus aval du système hydrogéologique. Elle constitue naturellement le lieu de convergence des eaux karstiques froides en provenance des Causses d'Aumelas et de la Gardiole et également d'une part d'eaux thermales minéralisées d'origine profonde.

L'actualisation du contexte géologique réalisée dans le cadre de DEM'Eaux Thau (BRGM/RP-68483-FR) laisse suggérer que les eaux thermales d'origine profonde transitent par la faille de Thau et non au droit de la Vise comme conceptualisé antérieurement.

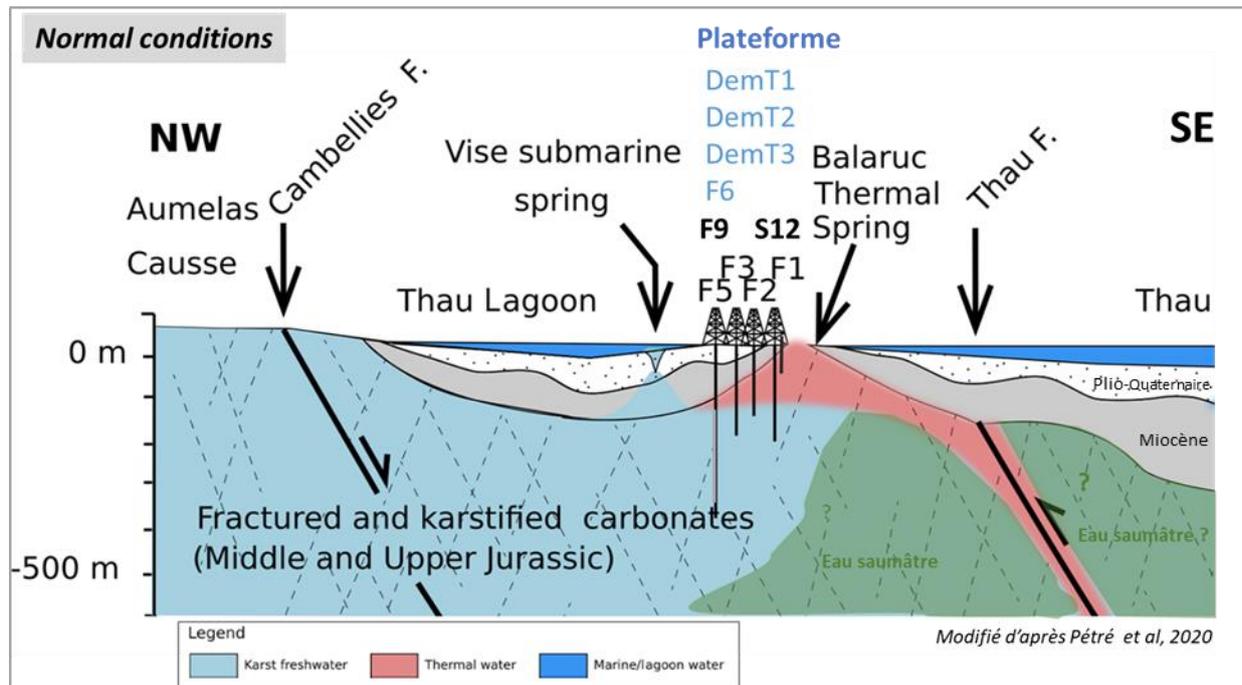


Figure 3 : Coupe hydrogéologique interprétative révisée (projet DEM'EAUX Thau).

Les eaux thermales qui sont retrouvées en sub-surface au toit du Jurassique Supérieur occupent au sein de l'aquifère récepteur fortement karstifié une extension spatiale réduite (compte tenu des informations des forages disponibles sur la presqu'île de Balaruc). Selon Tessier (1988), la géométrie de la « bulle thermique et minérale » est conditionnée par le toit imperméable (formation peu perméable du Miocène) et la présence sous-jacente et latérale d'eaux froides, douces et salées. Historiquement l'exutoire des eaux thermales de Balaruc se situait à proximité

du point S12 (cf. description BRGM/RP-68483-FR). Les contrastes de densité des différents types d'eau souterraine de Balaruc donnent lieu à l'existence de plusieurs interfaces hydrauliques se déplaçant suivant l'importance respective des différentes charges hydrauliques mises en jeu (pompages, niveau de l'étang, recharge par les précipitations). Cette configuration hydrogéologique singulière a été confirmée et illustrée à l'aide des investigations réalisées en 2007 sur le forage carotté F13 réalisé par les thermes. Ces différents réservoirs sont en interaction les uns avec les autres selon des processus complexes qui sont étudiés dans le cadre du projet DEM'Eaux Thau.

L'étude de modélisation à l'aide de l'outil GARDENIA, s'est focalisée sur les principaux exutoires de la zone d'étude, ceux-ci étant associés aux compartiments amont et aval de l'entité A.V.I.C.

2.2. COMPARTIMENT AMONT : DONNÉES SUR LE SYSTÈME VÈNE (TROP-PLEIN) - ISSANKA

Ce paragraphe décrit brièvement les données de hauteur d'eau et de débit utilisées dans l'approche de modélisation GARDENIA.

La source d'Issanka est l'exutoire principal du compartiment amont de l'aquifère dont l'impluvium de recharge est situé sur le causse d'Aumelas et la montagne de la Moure. La source temporaire de la Vène (à Cournensec) constitue la source de trop plein majeure du système karstique. Cette dernière se met à déborder en période de hautes eaux, en réponse aux épisodes de recharge importants. Le trop-plein des Oulettes (à Montbazin) constitue l'autre exutoire temporaire du système karstique, ce dernier coule exceptionnellement suite aux épisodes pluvieux majeurs (>100 mm). Les débits des deux trop-pleins contribuent de manière importante au débit de crue de la Vène mesuré à la station hydrométrique aval (à Poussan) implanté à l'aval du champ captant de la source karstique d'Issanka.

La station hydrométrique aval a été suivie par HSM¹ entre avril 1999 et juillet 2018 (par le SMBT depuis juillet 2020) :

- **en période de hautes eaux**, la station hydrométrique aval permet de connaître de manière globale, les volumes d'eau issue du karst (trop plein d'Issanka et trop-plein de la Vène+Oulettes) si l'on néglige, en approximant, les apports par les débits de ruissellement du bassin versant miocène drainé par la Vène ;
- **en période de moyenne eau**, le trop-plein de la Vène cesse de fonctionner, le débit de la Vène à la station hydrométrique aval est alors soutenu par le débit de trop-plein du champ captant d'Issanka (Pavillon décharge, cf. L1, BRGM/RP-68483-FR) ;
- **en période de basses eaux**, le trop-plein de la source d'Issanka cesse de fonctionner, un débit réservé de 11 l/s est alors apporté à la Vène (pompage dans la nappe dans le forage F5). Les débits gravitaires collectés à la source en période de basses eaux permettent d'approximer les débits de la source qui s'écoulerait dans la Vène en absence de prélèvement, l'évolution des débits gravitaires étant par ailleurs directement reliés au niveau piézométrique de l'aquifère mesuré au niveau du champ captant. Ce comportement a été mis à profit pour établir une courbe de tarage entre les débits gravitaires et la piézométrie (cf. ci-après § 2.2.1).

¹ Osu-Oreme/Medicyss

La piézométrie du site d'Issanka a été mesurée par Véolia jusqu'en 2015 (données mensuelles entre 1992 et 2002, données journalières avec lacunes jusqu'en 2015), et par Suez depuis 2017 (données journalières avec lacunes). Dans le cadre du projet Dem'Eaux Thau, des suivis au pas de temps de 15 mn (H, C et T) sont réalisés dans la source Issanka (BSS002JCUL) depuis avril 2019.

La limite du seuil de débordement de la source d'Issanka est proche de 9,1 m NGF, lorsque la piézométrie devient inférieure, le pompage sur l'ouvrage F5 est actionné pour assurer le débit réservé de la Vène à l'aval du champ captant (Figure 4). En annexe (Figure A- 1 à Figure A- 3), des informations complémentaires sont présentées pour décrire le fonctionnement de la source d'Issanka.

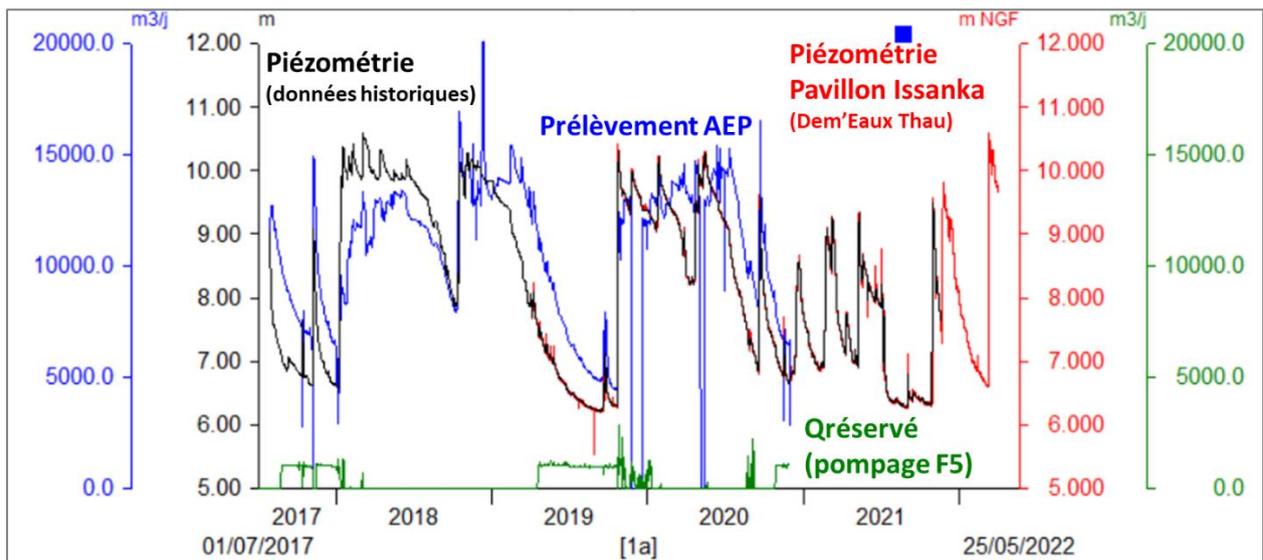


Figure 4 : Évolution de la piézométrie du champ captant d'Issanka (depuis 2017) et évolution des débits gravitaires prélevés pour l'AEP et des débits pompés pour le débit réservé de la Vène.

Le dispositif de métrologie existant permet de suivre, depuis 1969, les variations du niveau du karst dans la zone de trop-plein de la Vène à Cournonsec (BSS002JDBC). Environ 200 m à l'aval, le débit de trop-plein de la Vène a été suivi par HSM² entre octobre 2005 et juillet 2018, une courbe de tarage entre les débits d'exhaure du karst et la piézométrie du karst a été établie au pas de temps journalier (cf. ci-après § 2.2.2).

La connaissance des débits de la station hydrologique aval (bassin hydrogéologique estimé à 140 km²) et des débits gravitaires prélevés à Issanka permet de reconstruire l'hydrogramme « naturel » des flux issus du karst ce qui constitue une information capitale pour le projet Dem'Eaux Thau en permettant notamment d'établir des bilans hydrogéologiques sur la partie amont de l'entité A.V.I.C.

² Osu-Oreme/Medicys

2.2.1. Relation Débit gravitaire (AEP) versus Piézométrie-Issanka

Les données journalières des volumes gravitaires prélevés sur le champ captant d'Issanka sont bancarisées depuis 2006, avec lacunes. Les lacunes de prélèvement ont été estimées à partir de la piézométrie mesurée à la source d'Issanka lorsque cette dernière était disponible. La courbe de tarage est présentée sur la Figure 5.

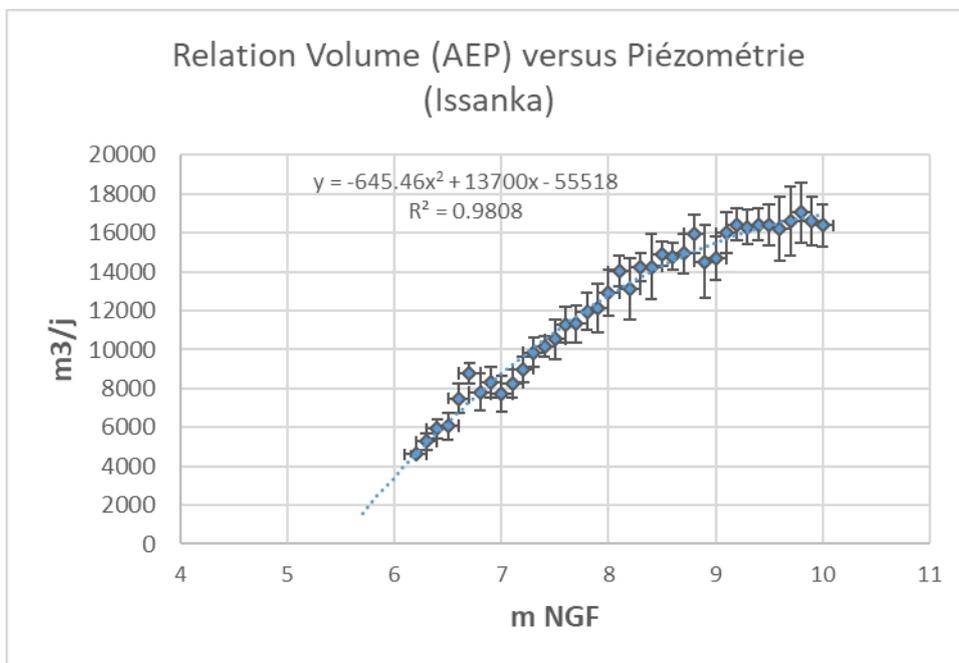


Figure 5 : Relation débit gravitaire versus piézométrie dans le karst mesuré au niveau d'Issanka.

2.2.2. Relation débit moyen journalier du trop-plein de la Vène versus piézométrie dans le karst (BSS002JDBC)

Le trop-plein du karst s'active lorsque la piézométrie devient supérieure à 38,1 m NGF. Deux courbes de tarage selon la valeur de la piézométrie ont été considérées, une forme polynomiale d'ordre 2 si la piézométrie est inférieure à 39 m NGF, une relation linéaire est considérée si piézométrie est supérieure à 39 m NGF (Figure 6).

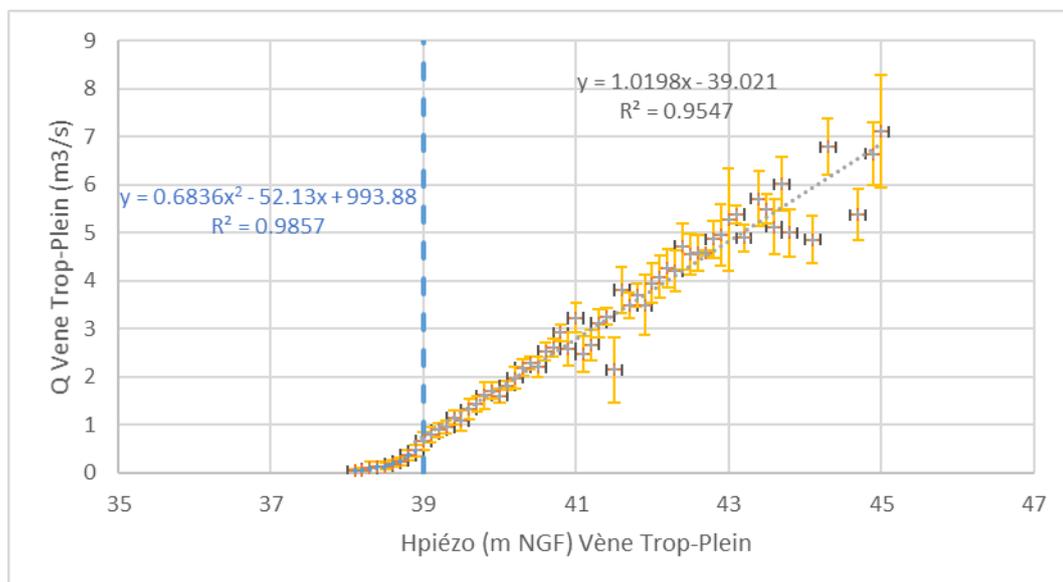


Figure 6 : Relation débit moyen journalier du trop-plein de la Vène versus piézométrie dans le karst (BSS002JDBC).

2.2.3. Caractérisation des flux issus du compartiment amont de l'entité A.V.I.C. contribuant à la Vène

La Figure 7 présente de manière détaillée les évolutions mesurées entre janvier 2013 et décembre 2014. En période de basses eaux, les débits à l'aval s'effondrent lorsque les débits du trop-plein du champ captant (CC) d'Issanka cessent, le phénomène se produit lorsque la charge piézométrique dans le karst à Issanka devient inférieure à 9 m NGF. La connaissance des débits de trop plein du karst et des débits gravitaires prélevés à Issanka permet de reconstruire l'hydrogramme « naturel » du compartiment karstique amont de l'entité A.V.I.C. (voir exemple de la Figure 7). Ce débit « naturalisé » constitue une information capitale pour le projet Demeaux Thau en permettant notamment d'établir des bilans hydrogéologiques sur l'entité Vène-Issanka. La connaissance de ces flux permettra par ailleurs d'évaluer l'importance des flux d'eau profonds (occultes) qui contribuent à l'alimentation de l'aquifère au sein de la presqu'île de Balaruc.

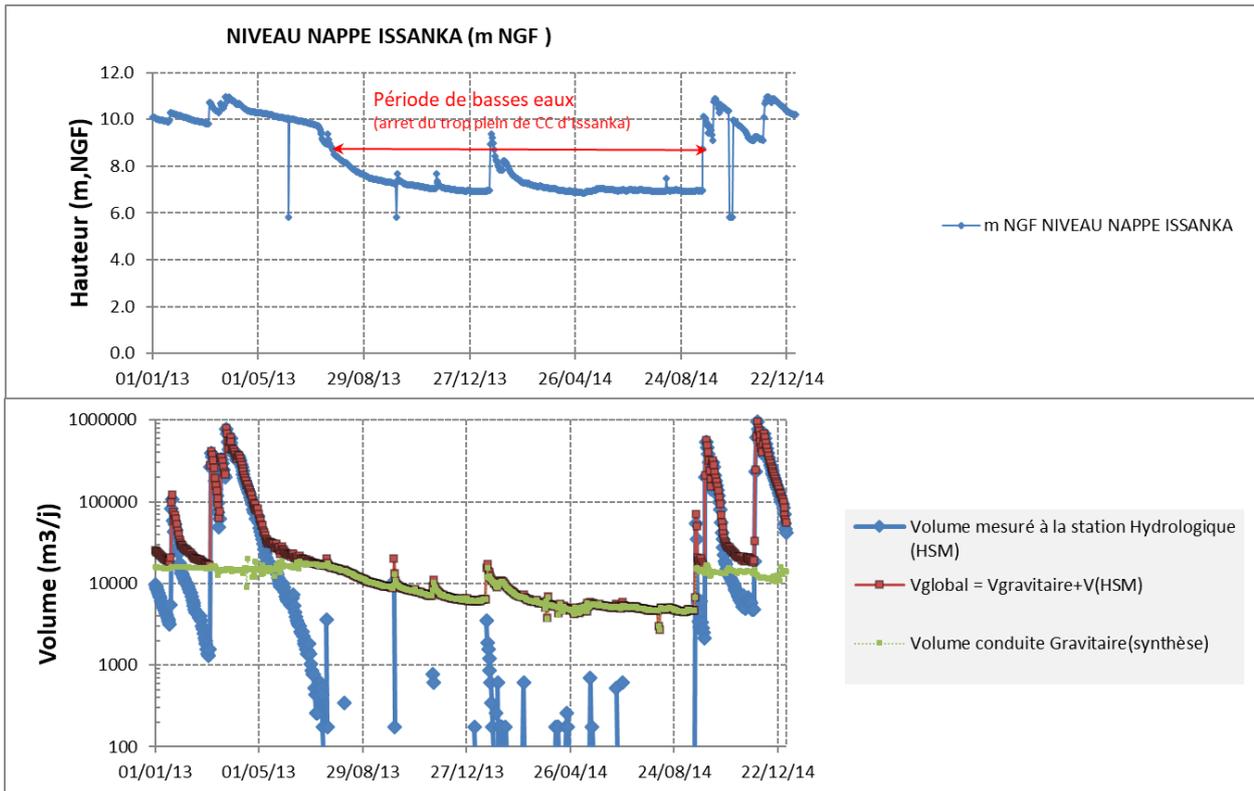


Figure 7 : Évolution de la piézométrie à Issanka (2013-2015) et des débits gravitaires prélevés au captage. Les débits mesurés sur la Vène à l'aval d'Issanka (station aval HSM) permettent de connaître les flux issus du compartiment amont de l'entité A.V.I.C. contribuant à la Vène. La somme des débits mesurés (VGlobal) permet d'accéder à l'hydrogramme « naturalisé » de l'hydrosystème.

La reconstitution des débits « naturalisés » du compartiment amont couvre la période 2005-2020, avec lacunes.

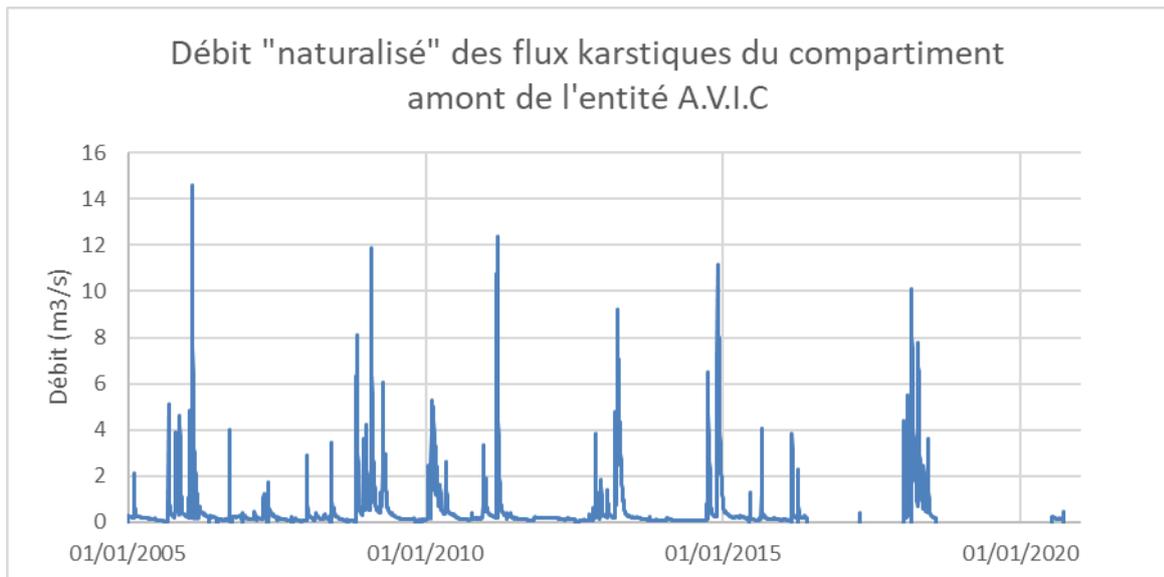


Figure 8 : Évolution des flux karstiques issus du compartiment amont de l'entité A.V.I.C. contribuant à la Vène (période 2005-2020).

2.3. COMPARTIMENT AVAL : DONNÉES SUR LES DÉBITS DES SOURCES (VISE, CAUVY, AMBRESSAC) ET LA PIÉZOMÉTRIE AU SEIN DE LA PRESQU'ÎLE DE BALARUC

2.3.1. Chroniques piézométriques

Des chroniques historiques sont disponibles sur les ouvrages CGE-Tennis (BSS002JEHM) et P4-Balme (BSS002JEKE), respectivement depuis 1997³ et 2003⁴. La Figure A- 4 en annexe présente les évolutions mesurées depuis 2010. Ces chroniques seront utilisées dans la modélisation à l'aide de GARDENIA.

La Figure A- 5 en annexe présente les évolutions mesurées depuis 2010 à proximité de la source de Vise (<400 m) dans les ouvrages F4 (BSS002JDVA) et F6 (BSS002JDXA) instrumentés depuis 2001⁵ et 2007⁶ respectivement.

La Figure 9 présente pour la période récente (2017-2022), les évolutions mesurées au sein de la presqu'île de Balaruc suite au renforcement du réseau d'observation dans le cadre du projet Dem'Eaux Thau.

À l'aval hydraulique du champ captant d'Issanka, le karst sous couverture (F5-Autoroute et F5 Mouillères Basses) et dans une moindre mesure CGE-Tennis présentent des évolutions très comparables, celles-ci sont similaires aux évolutions mesurées à Issanka. À proximité de la Vise (F4/F6), les pertes de charge linéaires dans le karst et le potentiel hydraulique imposé du plan d'eau de la lagune contribuent à fortement atténuer le signal piézométrique amont.

L'inversac 2020/2022 a provoqué une augmentation généralisée de la piézométrie de l'aquifère du compartiment aval comme le témoigne les évolutions mesurées (cf. également le L11b, Ladouche *et al.*, 2022 BRGM/RP-70839-FR).

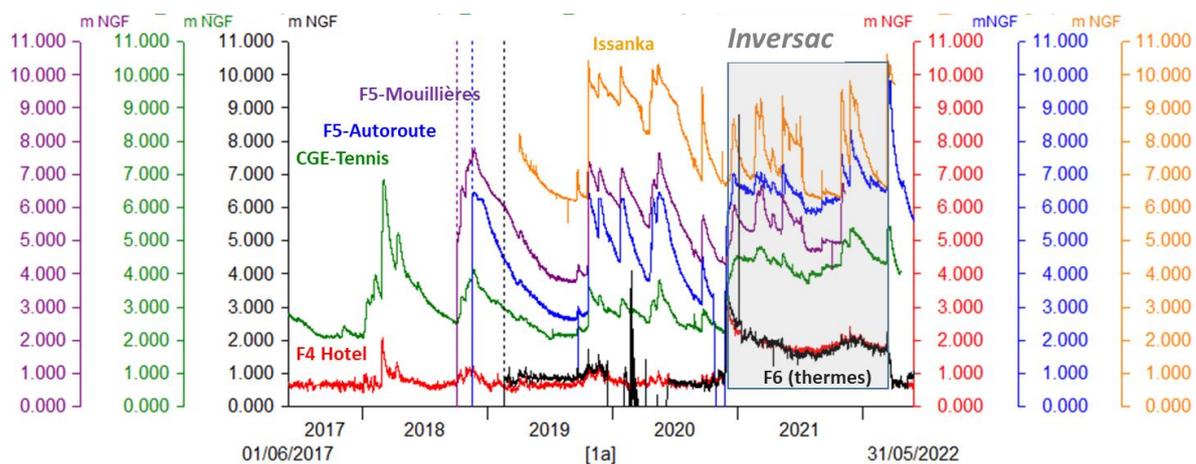


Figure 9 : Évolution piézométrique de la piézométrie au sein du compartiment aval de l'entité A.V.I.C. depuis juin 2017 et comparaison aux mesures réalisées à Issanka.

³ CGE-Tennis (BSS002JEHM) : de 1997 à 2000, données mensuelles avec lacunes, depuis 2000, données journalières à infra journalières avec lacunes.

⁴ P4-Balme (BSS002JEKE) : depuis 2003, données journalières à infra journalières avec lacunes.

⁵ F4 (BSS002JDVA) : depuis 2001, données infra journalières avec lacunes.

⁶ F6 (BSS002JDXA) : de 2007 à 2014 données journalières avec lacunes, depuis 2019 ; données infra journalières avec lacunes.

2.3.2. Source de la Vise

La source sous-marine de la Vise ([BSS002JDMR](#)) située dans la lagune de Thau à l'Ouest de la presqu'île de Balaruc-les-Bains (Figure 10) constitue l'un des exutoires naturels les plus importants de l'aquifère des calcaires karstifiés du Jurassique du compartiment aval de l'entité A.V.I.C., les autres exutoires étant les sources de Cauvy et d'Ambressac.



Figure 10 : Situation de la source sous-marine de la Vise à Balaruc-les-Bains.

L'acquisition de données sur la Vise a constitué un élément-clé du projet de recherche DEM'EAUX Thau, initié et coordonné par le BRGM. La conception de l'instrumentation de la source de la Vise a dû faire face à plusieurs enjeux : griffon submergé sous une trentaine de mètres d'eau saumâtre, au point bas d'un cône de sédiments, éloignement de la côte de 160 m environ, présence d'anciens équipements (buse métallique, sacs de ciments...), zone fortement fréquentée par les pêcheurs et les plongeurs, ... Les livrables L7 (BRGM/RP-69163-FR) et L10 (BRGM/RP-70842-FR) présentent de manière détaillée le design de l'instrumentation et les premières acquisitions réalisées.

La source de la Vise fait l'objet d'un suivi dans le cadre du projet Dem'Eaux Thau depuis le mois de juillet 2019 (débit, température et conductivité, Figure 11). Sur la période du 1er juillet 2019 au 27 novembre 2020, le débit moyen de la source de la Vise est de 119 l/s. Pendant l'inversac (28 novembre 2020 au 14 mars 2022), le débit moyen d'absorption du griffon de la Vise (Lagune vers système karstique) est de 182 l/s.

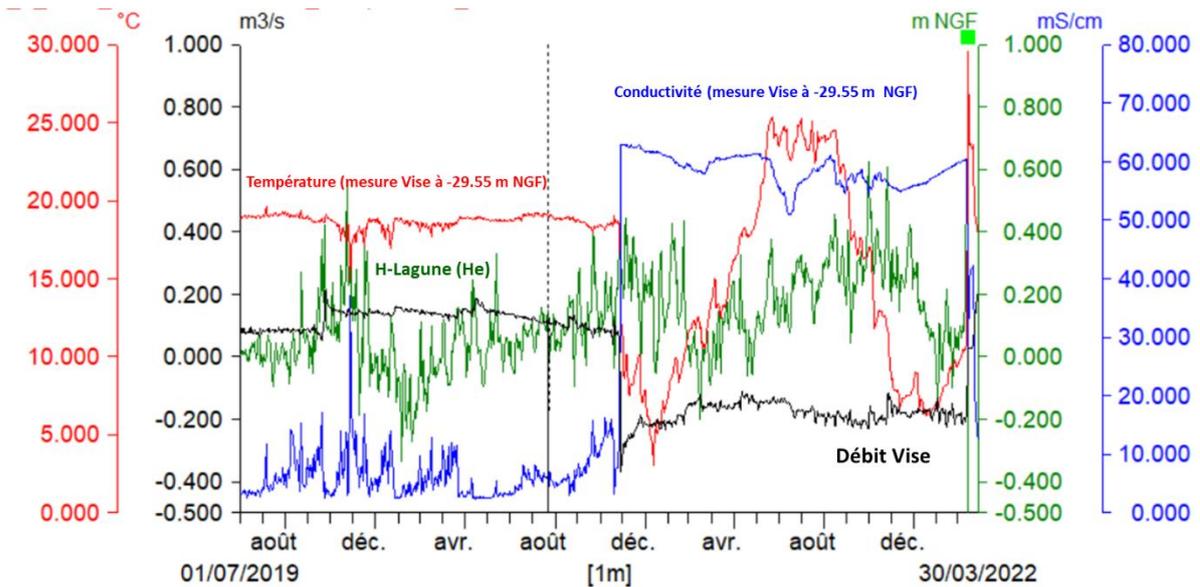


Figure 11 : Suivis réalisés à la source de la Vise depuis juillet 2019.

2.3.3. Source de Cauvy

La source de Cauvy ([BSS002JDNJ](#)) a été exploitée pour l'alimentation en eau potable du syndicat de Frontignan-Balaruc entre 1930 et 2014. Suite à l'épisode d'inversac de 2014, le captage a été définitivement abandonné en raison notamment des augmentations importantes des teneurs en chlorure des eaux de la source.

Le captage de Cauvy a fait l'objet d'un suivi hydrodynamique régulier depuis 1998 (cf. Ladouche *et al.*, 2019, L1/BRGM/RP-68483-FR), différents opérateurs ou organismes ont réalisé des suivis au niveau du captage ou légèrement en aval⁷. Dans le cadre du projet Dem'Eau Thau, une chronique synthétique de variation des niveaux d'eau de la source a été établie sur la période 1998-2022. De même, une chronique de prélèvement AEP sur la période 2005-2014 (données journalières) a été établie (Figure 12).

⁷ De 1998 à 2006, DIREN-LRO, données journalières à infra journalières avec lacunes.

De 2007 à 2010, Véolia, données journalières avec lacunes.

De 2010 à 2011, BRGM, données journalières.

De 2011 à 2022, CG34, données infra journalières avec lacunes.

Suivis par le SMTB depuis 2018, à l'aval immédiat de l'ancien captage, données infra journalières avec lacunes.

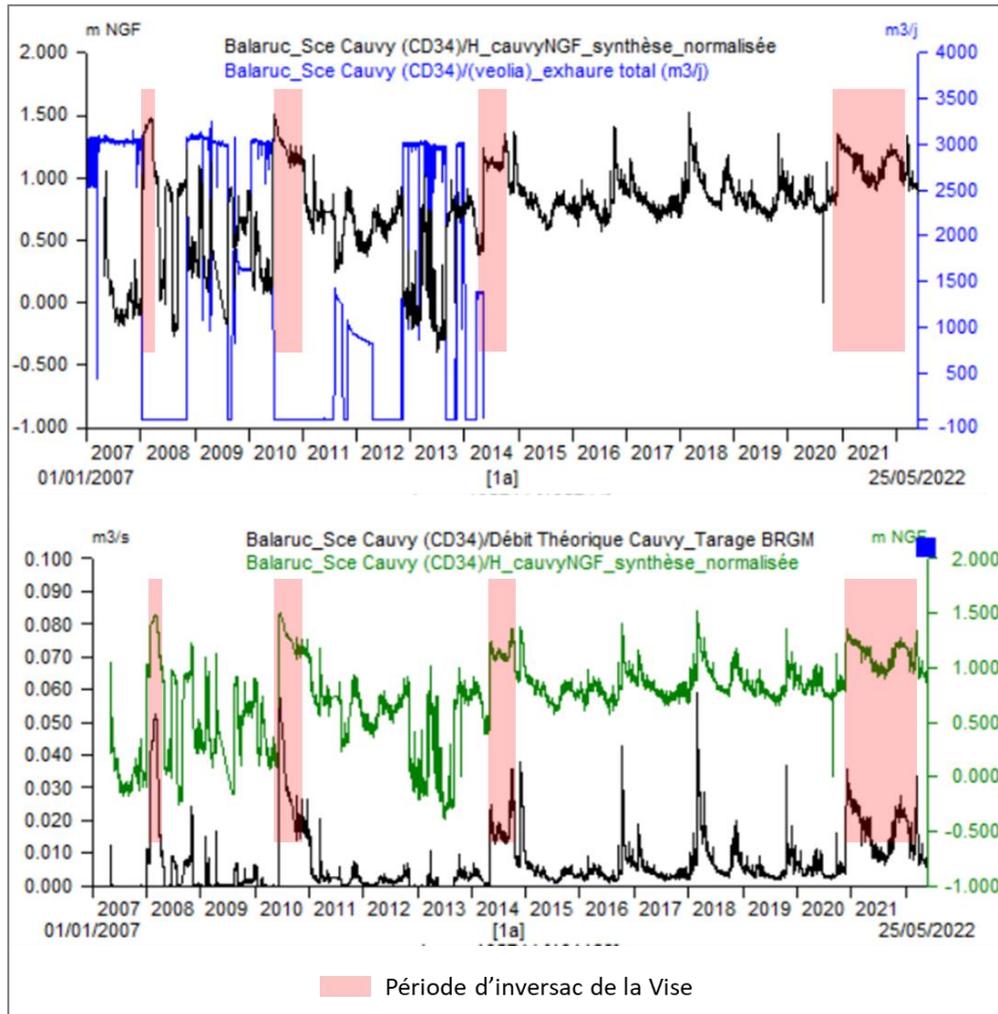


Figure 12 : Évolution de la piézométrie mesurée à la source de Cauvy. Les débits de prélèvement AEP ainsi que les débits estimés de la source sont également reportés.

Une courbe de tarage des débits de la source a été établie dans le cadre du projet sur la base des jaugeages ponctuels réalisés principalement au cours de l'inversac 2020-2022 (Figure A- 7 en annexe). Sur la période 2021-2022, le capteur de hauteur de la source a présenté des défaillances, les hauteurs d'eau ont été estimées à partir des corrélations établies à l'aide des suivis du forage F4 (BSS002JDVA). Les résultats de ces traitements sont reportés en annexe (Figure A- 7 en annexe). La Figure 12 présente l'évolution des débits de la source depuis 2005, les valeurs mesurées après 2015 permettent d'accéder au débit naturel de la source, les mesures avant 2015 sont influencées par les pompages pour l'AEP.

Sur la période du 1er janvier 2015 au 27 novembre 2020, le débit moyen de la source Cauvy est de 5 l/s. Sur la période concomitante de suivi de la Vise (du 1er juillet 2019 au 27 novembre 2020), le débit moyen de la source Cauvy est de 5 l/s. Pendant l'inversac (28 novembre 2020 au 14 janvier 2022), le débit moyen de la source Cauvy est de 17 l/s.

2.3.4. Source d'Ambressac

La source et/ou les abords de la source d'Ambressac (BSS002JECB) a fait l'objet de nombreux aménagements au cours du 20^e siècle et depuis les années 2005 suite au rachat du site par la société Président Electronics (cf. Ladouche *et al.*, 2019, L1/BRGM/RP-68483-FR).

Le site dans sa configuration actuelle (cf. Figure A- 8) est composé d'une vasque et d'un bassin aval séparé par un seuil déversoir équipé d'une échelle limnigraphique. En période de basses eaux, le seuil permet de maintenir le niveau d'eau de la vasque à une cote légèrement supérieure à celle du bassin aval. Un débit d'inféoflux non jaugeable existe entre la vasque et le bassin aval, aucun écoulement se produit par déversement au-dessus du seuil. La configuration du bassin aval ne permet pas de mesure de débit en période de basses eaux. Un débit d'inféoflux non jaugeable existe entre le bassin aval et la lagune de Thau comme le témoigne les arrivées d'eau faiblement minéralisées ($C < 5$ ms) au niveau du petit port Suttel situé de l'autre côté de la route départementale D2.

En période de hautes eaux, les débits de la source qui se déversent dans le bassin aval sont drainés par un exhaure (phi-600) raccordé au fossé pluvial qui se déverse dans le port Suttel. Le SMBT (L. Cesmat, comm. Personnel) a établi la loi hydraulique de l'ouvrage de drainage du bassin aval en période de hautes eaux, quelques mesures ponctuelles au niveau de la source et les estimations des flux d'eau qui arrivent au niveau du port Suttel ont permis d'estimer les débits des périodes de basses eaux. La courbe de tarage de la source d'Ambressac est présentée en Annexe 1.

La source d'Ambressac fait l'objet d'un suivi dans le cadre du projet Dem'Eaux Thau depuis le mois de mars 2018 (hauteur, température et conductivité). Sur la période mars 2018-mai 2022, le débit moyen de la source est estimé à 5,5 l/s. Sur la période concomitante de suivi de la Vise (du 1^{er} juillet 2019 au 27 novembre 2020), le débit moyen de la source d'Ambressac est également de 5,5 l/s. Pendant l'inversac (28 novembre 2020 au 14 mars 2022), le débit moyen de la source d'Ambressac est de 1,4 l/s.

3. Modèle global avec l'outil GARDENIA

L'étude du fonctionnement hydrogéologique de l'entité AVIC à l'aide de l'approche de modélisation globale (logiciel GARDENIA) a visé d'une part, à qualifier le fonctionnement hydrogéologique du système karstique développé au sein du jurassique et d'autre part, à établir des bilans hydrogéologiques au sein des compartiments identifiés du système hydrogéologique.

L'étude a porté dans un premier temps sur le compartiment amont de l'entité dont l'impluvium de recharge est situé sur le causse d'Aumelas et la montagne de la Moure. La source d'Issanka est l'exutoire principal du compartiment amont, les sources temporaires de la Vène (à Cournensec) et des Oulettes (à Montbazin) constituent les exutoires temporaires de trop-pleins du système karstique, ils s'activent exceptionnellement suites aux épisodes pluvieux majeurs (> 100 mm). Ces écoulements contribuent à l'écoulement de la Vène dont les écoulements naturalisés ont été reconstitués puis modélisés dans le cadre de cette étude.

Dans un second temps, l'étude s'est focalisé sur la modélisation des flux de la Vise qui constitue l'exutoire principal du compartiment aval de l'entité AVIC.

3.1. PRÉSENTATION DE L'APPROCHE DE MODÉLISATION AVEC GARDENIA

Le modèle **GARDENIA** (modèle **G**lobal **A** Reservoir pour la simulation des **DE**bits et des **N**iveaux **A**quifères), développé par le BRGM (**Thiery**, 2014) est un modèle hydrologique global qui représente le cycle de l'eau depuis les précipitations sur un bassin versant jusqu'au débit à l'exutoire ou ponctuellement sur un piézomètre dans l'aquifère.

Ce modèle est global, car il considère une entrée « globale » (une « lame d'eau » sur le bassin et une évaporation potentielle) et une sortie qui sont suivant le cas d'étude, le débit à l'exutoire d'un bassin versant et/ou un niveau piézométrique.

Le modèle hydrologique global simule les principaux mécanismes du cycle de l'eau dans un bassin (pluie, évapotranspiration, infiltration, écoulement) par des lois physiques simplifiées. Ces lois physiques simplifiées sont décrites par un écoulement à travers une succession de trois réservoirs (cf. Figure 13) : le premier réservoir symbolise les premières dizaines de centimètres du sol dans lesquelles se produit l'évapotranspiration, le second symbolise une zone intermédiaire (zone non saturée) qui produit un écoulement rapide et un flux de recharge vers le troisième réservoir, l'aquifère, qui produit l'écoulement lent.

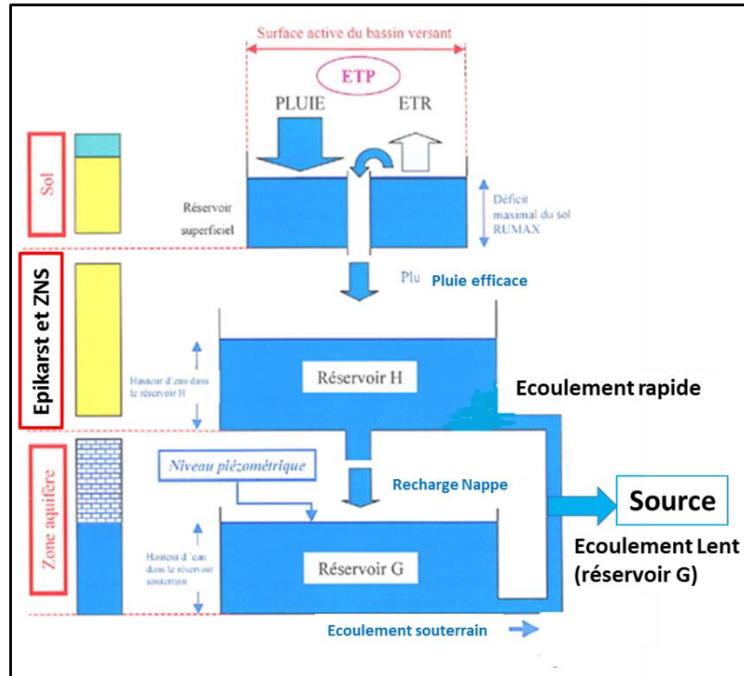


Figure 13 : Schéma de modélisation adopté pour décrire le fonctionnement des sources karstiques.

Les transferts d'un réservoir à l'autre sont régis par des lois simples décrites par des paramètres dimensionnels du modèle (capacité de rétention du sol, temps de transfert, seuils de débordement, etc). En raison du caractère global de cette schématisation et de la complexité du système hydrogéologique réel, ces paramètres, bien qu'ayant un sens physique, peuvent difficilement être déduits a priori des caractéristiques physiographiques ponctuelles du bassin versant (géologie, couverture végétale...).

Dans la pratique, les paramètres doivent donc être déterminés par ajustement (calibration) sur une ou deux séries d'observation (chronique de débit et/ou de piézométrie). Les calculs sont réalisés au pas de temps journalier. La calibration se fait par une méthode semi-automatique. L'utilisateur fournit un jeu de paramètres initiaux et indique les paramètres qui seront à optimiser. À partir de ceux-ci, le modèle fait varier ces paramètres (dans une gamme de valeurs définie par l'utilisateur) et recherche, par un algorithme d'optimisation non-linéaire adapté de la méthode de Rosenbrock (1960), un jeu de paramètres fournissant les résultats les plus proches possibles de la série d'observations. **Le modèle réalise un bilan entre les apports (précipitations) et les sorties (écoulements ou évaporation) à chacun des pas de calcul considéré (jour, décadaire, mensuel).**

Dans la pratique toujours, l'approche de modélisation GARDENIA permet d'analyser le fonctionnement hydrogéologique d'un hydrosystème en tenant compte des éventuelles sollicitations de la ressource (pompages ou apports ou pertes). Le modèle, une fois calé, est en mesure de simuler la réponse de l'hydrosystème (rivière ou source et aquifères) à des scénarios hydro-climatologiques incluant ou non des scénarios de prélèvement en eau. Pour plus de détails concernant le fonctionnement et les conditions d'utilisation du modèle GARDENIA, on se référera à son guide d'utilisation (Thiery, 2014).

3.1.1. Paramètre du modèle et Stratégie de calibration

Les paramètres du modèle GARDENIA pour calculer le débit d'une source karstique sont au nombre de sept :

- Surface du bassin d'alimentation : ce paramètre a été estimé sur la base des données disponibles (Cf. Cavalera 2007) ;
- Rsup-Prog (**optimisé**) : Capacité du réservoir superficiel de type sol et/ou épikarst disponible pour « l'évapotranspiration » (en mm) ; Ce réservoir a un comportement plus physique qu'une « réserve utile » en « tout ou rien ». Dans ce réservoir (réserve superficielle), l'évaporation réelle et la production de pluie efficace suivent des lois quadratiques, fonction de l'état de remplissage de ce réservoir ;
- T1/2-Perco (**optimisé**) : **Temps de 1/2 montée (=temps de 1/2 percolation)**. C'est le temps caractérisant la vitesse de réaction entre une pluie efficace et un accroissement de la composante lente du débit souterrain (temps en mois) ;
- RUIPER (**optimisé**) : **Hauteur de répartition Ruissellement/Percolation** (en mm). C'est la hauteur du réservoir H conduisant à une égale répartition entre écoulement rapide (ruissellement) et percolation alimentant l'écoulement lent. Quand le niveau dans le réservoir intermédiaire est égal à n fois cette hauteur, l'écoulement rapide instantané est égal n fois la percolation. Réciproquement, quand le niveau est égal à 1/n fois cette hauteur, la percolation est égale à n fois l'écoulement rapide ;
- T1/2-Tari (**optimisé**) : **Temps de 1/2 tarissement de la composante souterraine** (temps en mois). C'est le temps au bout duquel, en l'absence de recharge, le débit de la composante lente est divisé par deux.

Un paramètre supplémentaire est nécessaire pour exprimer le niveau d'eau en piézométrie :

- Coef_Emmag : Coefficient d'emménagement global de l'aquifère ;
- Niv_Base : Ce paramètre correspond au niveau de nappe qui serait atteint au bout d'un temps infini en absence de recharge.

La calibration du modèle est effectuée simultanément sur le débit à l'exutoire et le niveau piézométrique en donnant un poids relatif (alpha et 1-alpha) à chacune des deux variables simulées. Le critère d'ajustement F est alors :

$$F = (\alpha \times F_Débit) + (1-\alpha \times F_Niveau)$$

en retenant comme critères de performance pour F_Débit et F_Niveau respectivement le coefficient de Nash sur la racine carrée des débits Nash $Q^{0.5}$ et sur la racine carrée de la piézométrie Nash $h^{0.5}$.

3.2. MODÉLISATION DES FLUX ISSUS DU COMPARTIMENT KARSTIQUE AMONT DE L'ENTITÉ A.V.I.C.

L'hydrogramme « naturel » du compartiment karstique amont de l'entité A.V.I.C. a été précédemment déterminé (cf. 2.2.3) sur la base des données de la station hydrométrique aval et des suivis piézométriques et des débits gravitaires du champ captant d'Issanka.

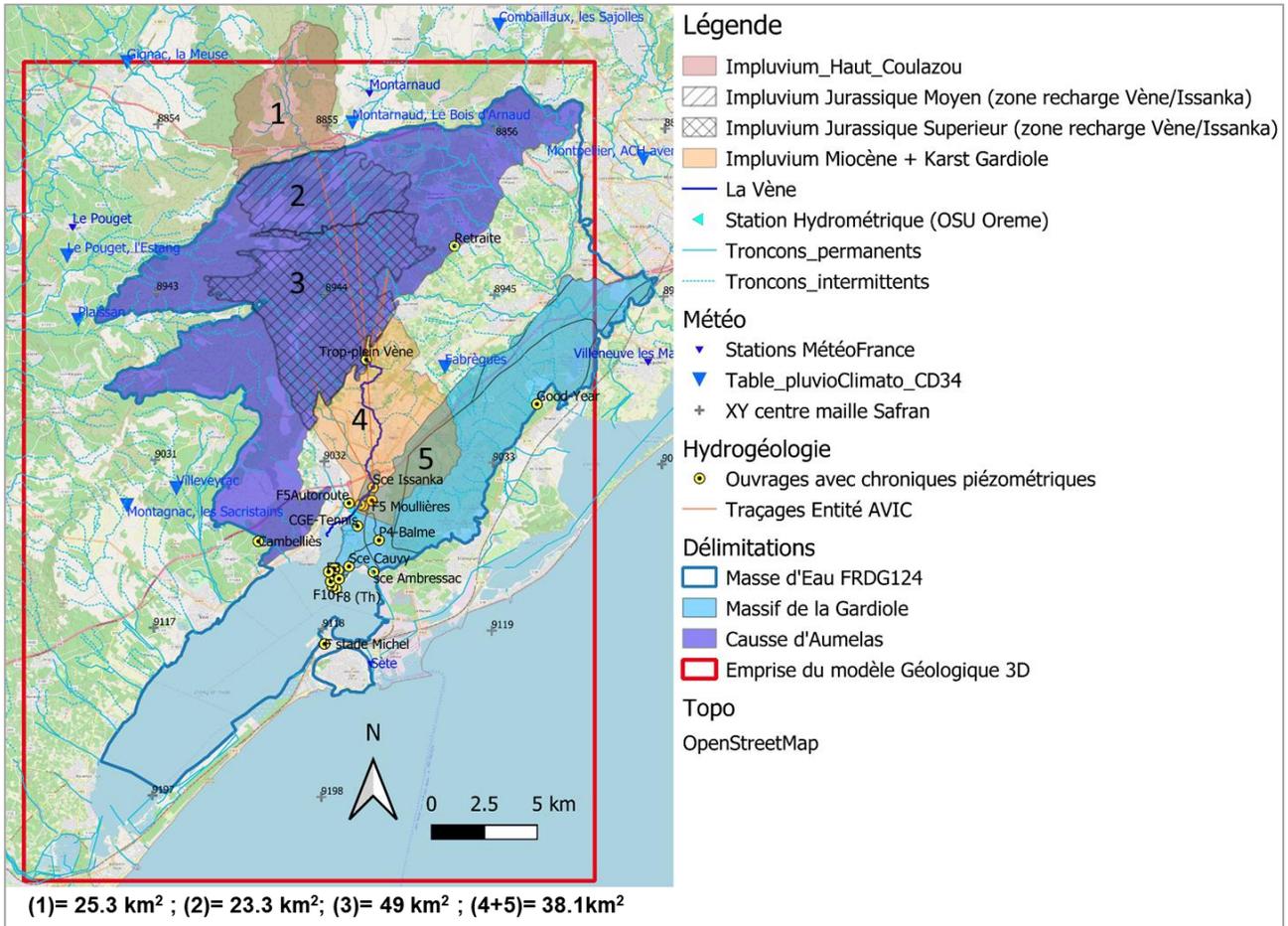


Figure 14 : Délimitation de l'impluvium à la station hydrométrique aval de la Vène (compartiment karstique amont de l'entité A.V.I.C.).

L'impluvium du compartiment karstique amont de l'entité A.V.I.C. défini pour la station hydrométrique aval a une surface de 135,6 km² (Figure 14). La surface de l'impluvium karstique qui contribue à la recharge de l'aquifère du compartiment amont est évaluée à 97,6 km² (surfaces 1+2+3 sur la figure). La surface du bassin miocène (4) dont les ruissellements de crue sont drainés par la Vène est de l'ordre de 28 km². Sur la zone (5) définie sur le massif de la Gardiole, les ruissellements de surface sont drainés par la Vène (10 km²), l'écoulement de recharge dans cette zone est au profit de l'aquifère du compartiment aval de l'entité A.V.I.C. Les données géochimiques de la source d'Issanka ainsi que les suivis piézométriques permettent en effet de démontrer l'absence de contribution des eaux souterraines du massif de la Gardiole à l'alimentation de la source d'Issanka.

3.2.1. Schéma conceptuel de modélisation adopté pour décrire le fonctionnement hydrogéologique.

Le schéma adopté pour la modélisation du compartiment karstique amont de l'entité A.V.I.C à l'aide du logiciel GARDENIA est présenté sur la Figure 15.

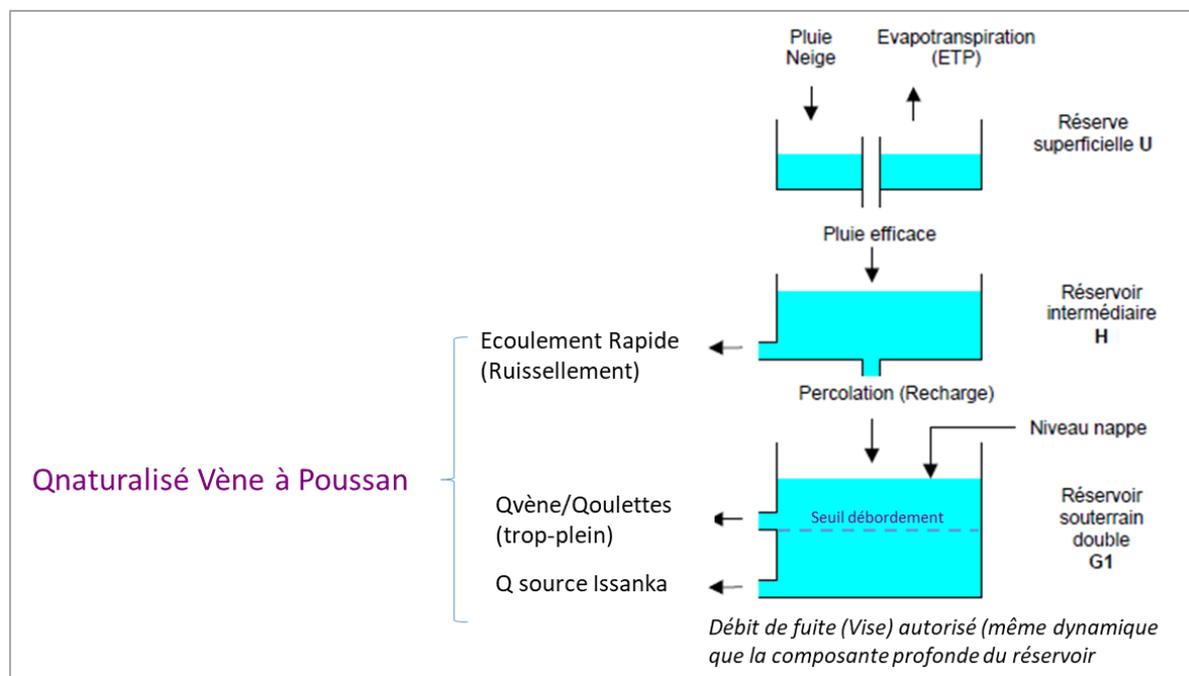


Figure 15 : Schéma conceptuel de modélisation adopté pour décrire le fonctionnement du compartiment karstique amont de l'entité A.V.I.C.

Le premier réservoir (nommé U) symbolise les premières dizaines de centimètres du sol dans lesquelles se produit l'évapotranspiration, ce réservoir produit la pluie efficace. Le second réservoir (nommé H) symbolise une zone intermédiaire (zone non saturée) qui produit un écoulement rapide et un flux de recharge vers le réservoir aquifère G1. Pour la zone d'étude, le réservoir H représente à la fois la zone non saturée du karst et également la partie miocène de l'impluvium (cf. Figure 14). Le troisième réservoir (nommé G1) représente l'aquifère. Les transferts d'un réservoir à l'autre sont régis par des lois simples décrites par des paramètres dimensionnels du modèle (capacité de rétention du sol, temps de transfert, seuils de débordement, etc. cf. § 3.1). Dans cette étude, le réservoir G1 est caractérisé par deux exutoires séparés par un seuil, le premier exutoire permet de représenter le fonctionnement des trop-pleins du karst (trop-plein de la Vène à Cournensec, trop-plein des Oulettes à Montbazin), le second exutoire permet de caractériser le fonctionnement de la source d'Issanka. Dans le schéma de modélisation, nous avons autorisé la possibilité d'un débit de fuite au profit du compartiment aval drainé par la Vise principalement.

3.2.2. Données utilisées pour la modélisation

a) Données d'ETP et de précipitation

Les données journalières d'évapotranspiration potentielle et de précipitation sont issues d'une pondération surfacique des données Météo-France des mailles SAFRAN correspondant à l'emprise sur la zone d'étude (cf. Figure 14). La surface totale considérée est de 135,6 km².

La fonction de pondération utilisée pour la pluie (PI) et l'ETP est :

$$PI \text{ ou ETP} = 1.16\% * 8854 + 30.81\% * 8855 + 1.2\% * 8943 + 38.81\% * 8944 + 1.14\% * 8945 + 19.5\% * 9032 + 7.38\% * 9033$$

Avec les nombres à 4 chiffres identifiant les mailles SAFRAN. Sur la période 1960-2020, le cumul moyen de précipitation est de 758 mm (médiane=703 mm), les cumuls min et max sont respectivement de 432 mm et 1370 mm.

b) Données de piézométrie

La chronique piézométrique considérée pour le calage du modèle est celle de l'ouvrage BSS002JDBC (trop-plein de la Vène à Cournonsec).

c) Données de débit

La chronique de débit considérée est celle de l'hydrogramme « naturel » du compartiment karstique amont de l'entité A.V.I.C., précédemment définie (cf. § 2.2.3).

3.2.3. Stratégie de calibration

Les paramètres du modèle sont rassemblés dans le tableau ci-après (Figure 16).

La superficie du bassin d'alimentation a été imposée (135,6 km²) ainsi que le niveau de base local (cf. descriptif Figure 16) de la nappe qui a été fixé à 5 m NGF. Les suivis à la source d'Issanka indiquent que les niveaux piézométriques locaux sont de l'ordre de 6 m NGF en période de très basses eaux.

Les six autres paramètres (Figure 16) ont été estimés par la procédure automatique de calage de GARDENIA.

La calibration du modèle est effectuée simultanément sur le débit et le niveau piézométrique mesuré en donnant un poids relatif (alpha et 1-alpha) à chacune des deux variables simulées. Le critère d'ajustement F est alors :

$$F = (\alpha \times F_{\text{Débit}}) + (1 - \alpha \times F_{\text{Niveau}})$$

en retenant comme critères de performance pour F_Débit et F_Niveau respectivement le coefficient de Nash sur la racine carrée des débits Nash $Q^{0.5}$ et sur la racine carrée de la piézométrie Nash $h^{0.5}$. Dans cette étude, l'évolution piézométrique de l'aquifère (BSS002JDBC) est bien connue depuis 1969. Des incertitudes sur les débits, notamment en période de crue, demeurent ; dans ce contexte, alpha a été fixé à 0.25.

La période de calage des débits est comprise entre le 1^{er} janvier 2005 et le 31 décembre 2020.

Nom	Modèle Compartiment Amont AVIC _1 réservoir_Seuil_Facteur Echang(136km2)_controleAmont			Descriptif
Superficie	km2	135.6	calage automatique	C'est la superficie du bassin alimentation. Cette superficie est généralement connue. Dans certain cas, cette superficie est inconnue ou mal connue, à savoir : bassin d'alimentation d'une source; exutoire ne controlant qu'une partie du bassin versant. Dans ces cas l'optimisation par calage est conseillée.
Corr_Pluv	%	0.00		Coefficient de correction de la pluie
Corr_ETP	%	0.00		Coefficient de correction de le ETP
Rsup_Progr	mm	23.84	calage automatique	Capacité de la réserve superficielle progressive . Dans ce réservoir superficiel, l'évaporation réelle et la production de pluie efficace suivent des lois quadratiques, fonction de l'état de remplissage de cette réserve.
Rui_Perco	mm	339.8	calage automatique	C'est la hauteur du réservoir H conduisant à une égale répartition entre écoulement rapide (ruissellement) et percolation (recharge) alimentant l'écoulement lent
Seuil_Sout1	mm	1.04	calage automatique	Seuil d'écoulement souterrain n°1 (si réservoir double)
T1/2_Perco	mois	2.22	calage automatique	Temps de ½ percolation. C'est le temps caractérisant la vitesse de réaction entre une pluie efficace et un accroissement (une reponse) de la composante lente du débit.
T1/2_Taris1	mois	0.0033	calage automatique	Temps de ½ tarrissement souterrain. C'est le temps au bout duquel, en absence de recharge, le débit de la composante lente est divisé par 2.
Débit_extér	m3/s	0.00		Débit extérieur (Qext) éventuel. Ce débit exterieur est non controlé par la mesure à l'exutoire. Le débit observé (Qobs) se déduit du calculé (Qcal) par la relation : $Q_{obs}=Q_{cal}+Q_{ext}+écart_simulation$
Coef_Emmag	-	3.0E-03	calage automatique	Coefficient d'emménagement équivalent de la nappe. C'est le coefficient d'emménagement apparent global de la nappe
Niv_Base	m	5.00	Fixé	Niveau de base locale de la nappe. Ce paramètre correspond au niveau de nappe qui serait atteint au bout d'un temps infini en absence de recharge

Figure 16 : Paramètres du modèle après calibration (compartiment karstique amont de l'entité A.V.I.C.).

3.2.4. Résultats

Les figures suivantes (Figure 17 et Figure 18) rassemblent les résultats obtenus par modélisation. Le coefficient Nash-Global est de 0.62, les résultats sont jugés significatifs et représentatifs du fonctionnement du système aquifère.

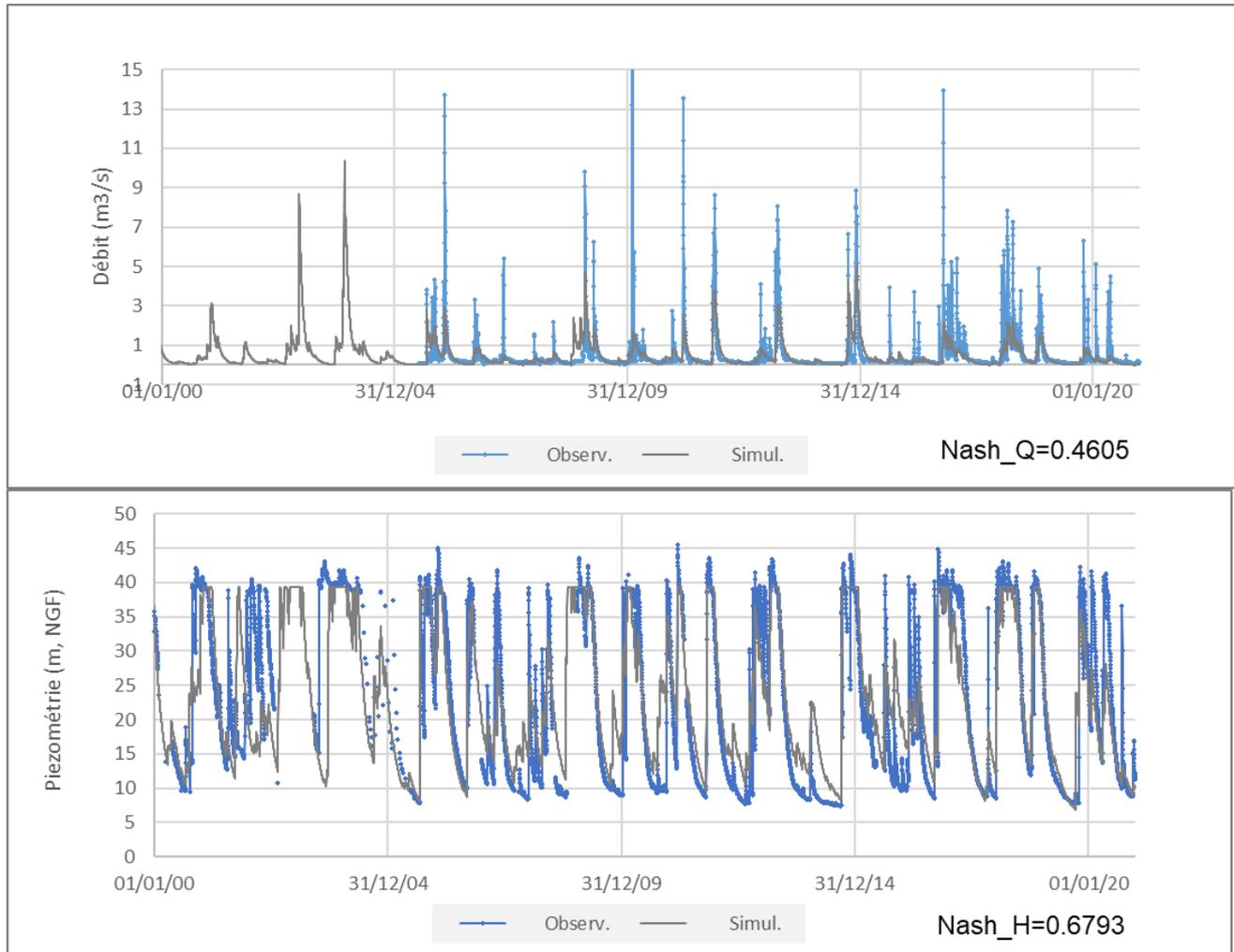


Figure 17 : Évolution des débits (observation/simulation) et des hauteurs d'eau (observation/simulation), modèle GARDENIA (compartiment karstique amont de l'entité A.V.I.C.).

La capacité de la réserve superficielle progressive est faible (23,8 mm, Figure 16) ce qui apparaît cohérent car la nature karstique de la zone d'étude n'est pas propice à d'importants développements de sol. La valeur du coefficient Rui_Per est assez élevée (340 mm environ), le débit en période de crue est assuré par une part importante d'écoulement souterrain, l'écoulement par la composante rapide (QH) du modèle devient majoritaire lors des crues importantes ($Q > 5 \text{ m}^3/\text{s}$).

Le seuil d'écoulement souterrain est très faible (1,04 mm) ce qui traduit que les trop-pleins du karst s'activent globalement peu souvent à l'échelle du cycle hydrologique. Le temps de demi percolation ($T_{1/2_Perco}$) est de 2,2 mois ce qui dénote que le transfert de la recharge en direction de la zone noyée de l'aquifère est globalement assez lent. Le temps de demi tarissement ($T_{1/2_Tari}$) est faible (0,0033 mois) ce qui dénote que la zone noyée de l'aquifère karstique présente globalement une faible inertie.

Le coefficient d'emménagement équivalent de la nappe est faible (0.003) et caractéristique d'un aquifère captif, ce qui est cohérent puisque l'aquifère est globalement sous couverture Miocène dans le compartiment amont.

À titre d'information, le bilan moyen du modèle (Figure 18) indique que l'écoulement souterrain contribue de manière majoritaire (97 %) à l'écoulement naturalisé des flux karstiques issus de l'entité A.V.I.C. (compartiment amont). La pluie efficace moyenne est estimée à 156 mm/an (comprise entre 39,3 mm et 393 mm) tandis que la recharge moyenne est estimée à 153 mm/an (comprise entre 39 mm et 375 mm). Le flux d'échange au profit du compartiment aval représente environ 15 % du flux de recharge, soit 22,2 mm en moyenne (compris entre 15 mm et 34 mm) ce qui correspond à un volume compris entre 0,76 et 1,70 millions de m³/a. Ce flux d'échange vers le compartiment aval représente en moyenne 45 % du flux d'export (Q_souterr1+ Q_souterr2) du compartiment amont. La Figure 20 permet de synthétiser les résultats de cette étude.

Pluie	700,69	mm	Cumul moyen sur l'impluvium (135,6 km ²)
ETR	548,53	mm	Évapotranspiration réelle
Pluie_Effic	156,67	mm	Pluie efficace
Q_rapide	3,89	mm	Q_rapide = Composante rapide (écoulement superficiel) de l'écoulement
Q_souterr1	79,26	mm	Q_souterr1 = Trop-pleins du système karstique
Q_souterr2	51,36	mm	Q_souterr2 = débit de la source d'Issanka
Q_échange	-22,16	mm	Q_échange = Débit d'échange externe (> 0 = Apport ; < 0 = Export) => débit de fuite vers le compartiment aval
%Q_souterr	97	%	%Q_souterr = (Q_souterr + Q_souterr_lent) / (Q_rapide + Q_souterr + Q_souterr_lent) exprimé en %
%Q_échange	-14,96	%	%Q_échange = (Q_échange / Pluie_Effic) exprimé en %
%Q_rapide	2,68	%	%Q_rapide = (Q_rapide / Pluie_Effic) exprimé en %
Alim_sout1	152,78	mm	Recharge de l'aquifère

Figure 18 : Bilan moyen du modèle, période 2000-2020 (compartiment karstique amont de l'entité A.V.I.C.).

L'évolution temporelle des flux d'échange entre le compartiment amont et le compartiment aval est présentée dans la figure suivante (Figure 19). La comparaison avec la piézométrie mesurée aux ouvrages CGE-Tennis (BSS002JEHM) et P4-La Balm (BSS002JEKE) permet de montrer de manière très démonstrative le lien hydraulique entre les compartiments amont et aval, les évolutions mesurées dans le compartiment aval apparaissent fortement corrélées aux flux d'échange issus du compartiment amont. La contribution du compartiment amont est importante en période de hautes eaux (de l'ordre de 150 l/s) et apparaît globalement faible en période de très basses eaux (<30 l/s). Les phénomènes d'inversac récents se sont produits globalement lorsque le flux d'échange amont était faible (<50 l/s) à l'exception de 2010 (flux d'échange =100 l/s).

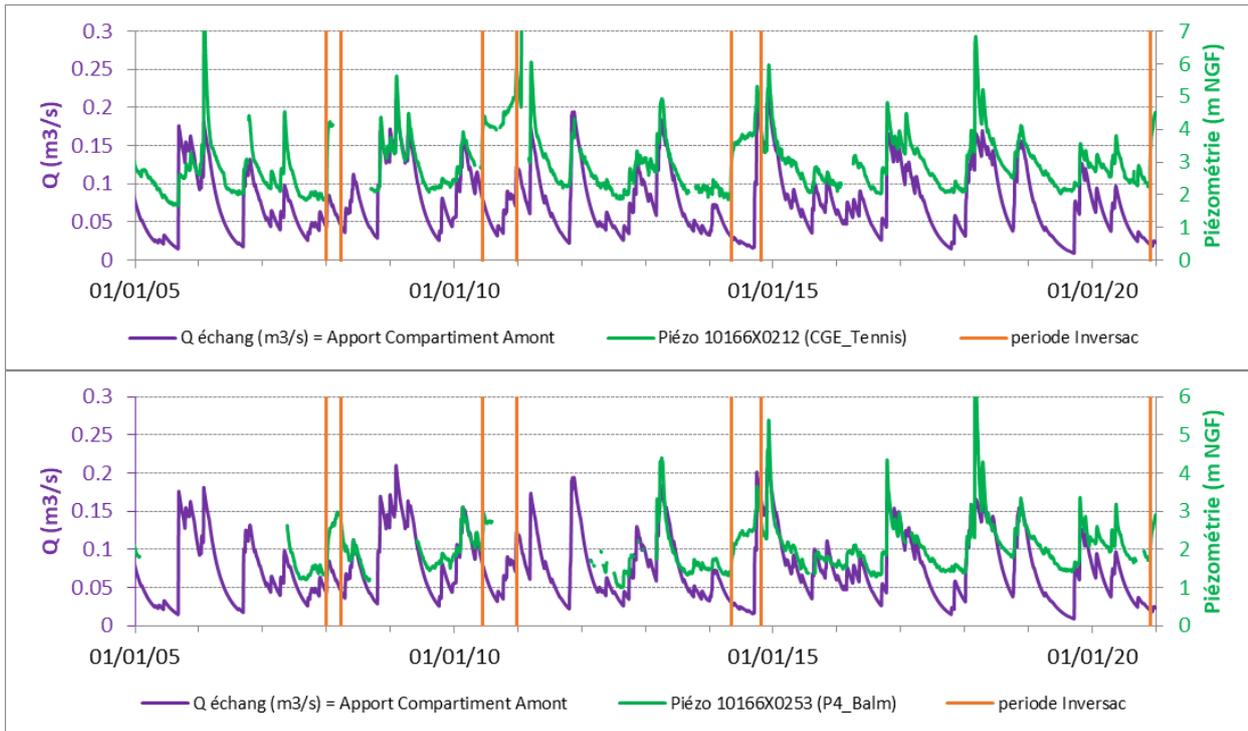


Figure 19 : Comparaison des flux d'échange entre le compartiment amont et aval de l'entité A.V.I.C. à la piézométrie mesurée au sein de la presqu'île de Balaruc (compartiment aval).

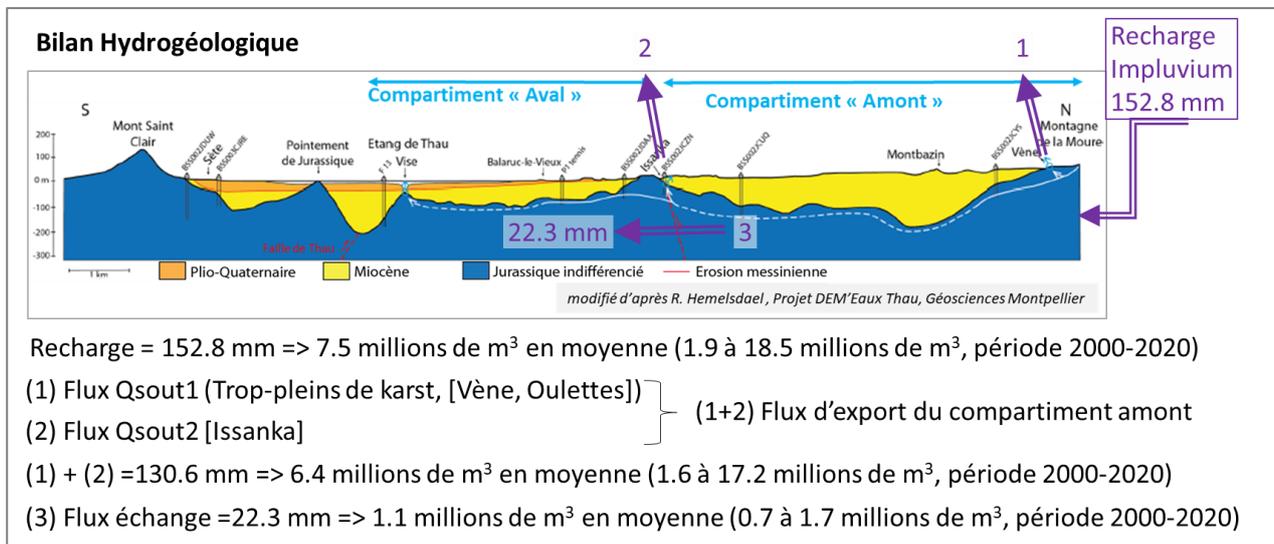


Figure 20 : Bilan hydrogéologique du compartiment amont de l'entité A.V.I.C.

3.3. MODÉLISATION DES FLUX DE LA VISE (COMPARTIMENT AVAL DE L'ENTITÉ A.V.I.C.)

3.3.1. Schéma conceptuel

Le schéma conceptuel adopté pour décrire le fonctionnement de la Vise est celui présenté sur la Figure 13, en considérant une alimentation par un flux externe en provenance du compartiment amont. Le modèle GARDENIA ne permet pas la prise en compte d'un flux externe variable, un flux constant moyen de 0,035 m³/s (1,1 millions de m³/a) a été considéré (cf.§ 3.2.4). Dans la modélisation, nous avons également considéré que le flux de ruissellement de l'impluvium karstique ne contribuait pas au débit de la source sous-marine de la Vise.

3.3.2. Données utilisées pour la modélisation

a) Données d'ETP et de précipitation

Les données journalières d'évapotranspiration potentielle et de précipitation sont issues d'une pondération surfacique des données Météo-France des mailles SAFRAN correspondant à l'emprise de l'impluvium du compartiment aval de la zone d'étude (cf. Figure 21). La surface totale considérée est de 20,6 km².

La fonction de pondération utilisée pour la pluie (PI) et l'ETP est :

$$PI \text{ ou ETP} = 77.98\% * 9032 + 8.66\% * 9033 + 13.37\% * 9118$$

Sur la période 1960-2020, le cumul moyen de précipitation est de 623 mm (médiane=586 mm), les cumuls min et max sont respectivement de 300 mm et 1 216 mm.

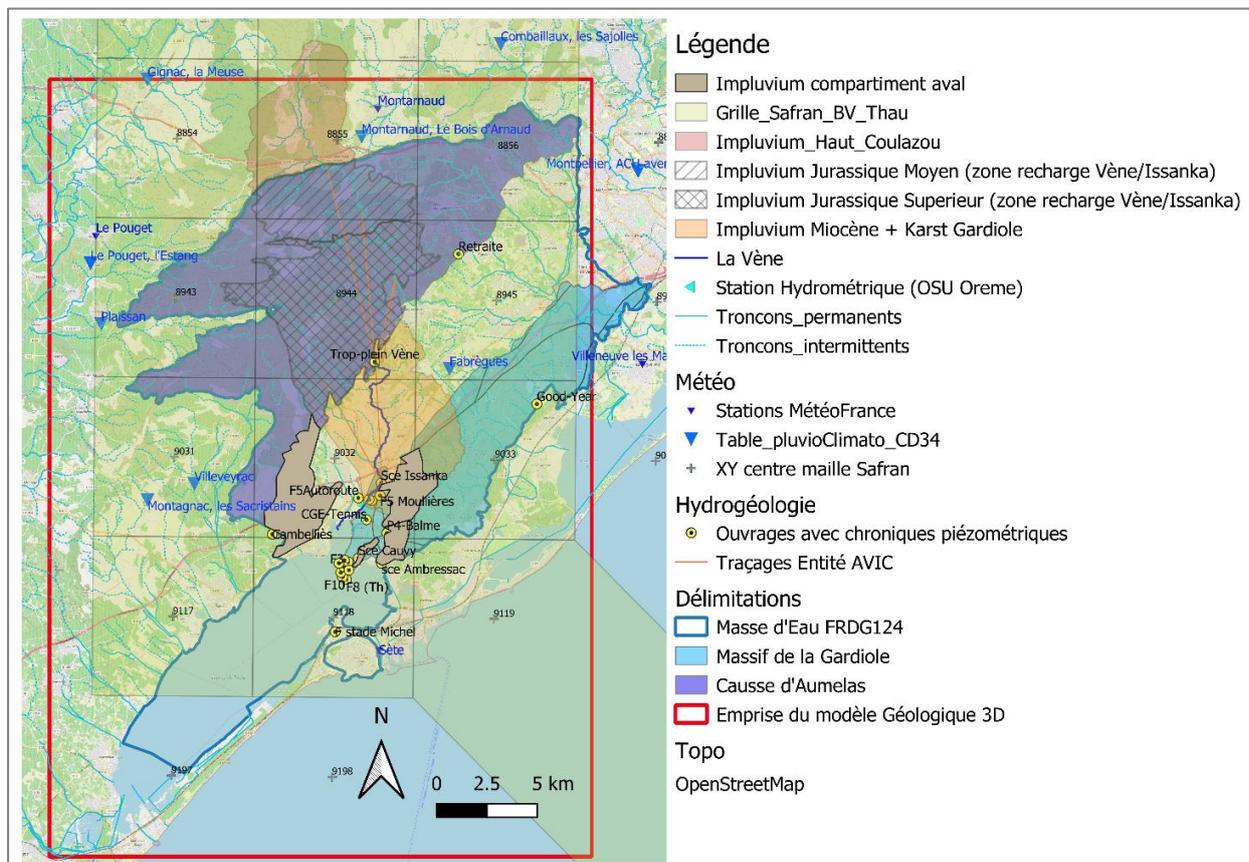


Figure 21 : Délimitation de l'impluvium karstique du compartiment aval de l'entité A.V.I.C.

b) Données de piézométrie

Les chroniques piézométriques considérées pour le calage du modèle sont celles des ouvrages P4-La Balm (BSS002JEKE) et CGE-Tennis (BSS002JEHM). Ces deux chroniques ont été prises séparément dans l'approche de modélisation GARDENIA.

c) Données de débit

La chronique de débit de la source sous-marine de la Vise considérée dans la modélisation est celle mesurée par le dispositif expérimental du projet Dem'Eaux Thau (cf. 2.3.2) avant le phénomène d'inversac (juillet 2019 au 28 novembre 2020).

3.3.3. Stratégie de calibration

La superficie du bassin d'alimentation a été imposé à 20,6 km², soit la surface de l'impluvium des calcaires affleurements rattaché au compartiment aval de l'entité A.V.I.C.

Le niveau de base locale de la nappe au niveau de la Vise a été fixé à 0,3 m NGF, soit une valeur légèrement plus faible que celle mesurée dans l'ouvrage F4 (situé à 460 m de la Vise) qui tend vers 0,5 m NGF en période d'étiage.

Les quatre autres paramètres (Coef Emmag ; Rui Perco ; T1/2 Perco ; T1/2 Taris1) ont été estimés par la procédure automatique de calage de GARDENIA.

La calibration du modèle est effectuée simultanément sur le débit et le niveau piézométrique mesuré en donnant un poids relatif (alpha et 1-alpha) à chacune des deux variables simulées. Le critère d'ajustement F est alors :

$$F = (\alpha \times F_{\text{Débit}}) + (1-\alpha \times F_{\text{Niveau}})$$

en retenant comme critères de performance pour $F_{\text{Débit}}$ et F_{Niveau} respectivement le coefficient de Nash sur la racine carré des débits Nash $Q^{0.5}$ et sur la racine carré de la piézométrie Nash $h^{0.5}$. Dans cette étude, le coefficient alpha a été fixé à 0.5 ce qui permet de donner le même poids relatif aux informations de débit et de piézométrie.

La période de calage des débits est du 26 juin 2019 au 28 novembre 2000.

3.3.4. Résultats

Les résultats sont rassemblés dans les figures ci-après (Figure 22 et Figure 23) et en annexe (Figure A- 11 et Figure A- 12). Les modèles permettent de reproduire de manière jugée satisfaisante les évolutions piézométriques et les débits mesurés (Figure A- 11 et Figure A- 12), le critère de Nash Global est proche de 0.6), toutefois, la chronique d'observation apparaît trop courte pour le calage de modèle.

À titre indicatif, les évolutions simulées par les deux modèles sont comparables (Figure 22).

La valeur du coefficient Rui_Per (92 à 100 m) apparaît plus forte que celle du modèle du compartiment amont (340 mm environ) ce qui suggère que la part du ruissellement de surface est plus importante dans le compartiment aval en période de crue.

Le temps de demi percolation (T1/2_Perco) est de 8 à 9 mois contre 2,2 mois pour le modèle du compartiment amont ce qui dénote que le transfert de la recharge en direction de la zone noyée de l'aquifère est significativement plus lent. Le temps de demi tarissement (T1/2_Tari) est compris entre 0.013 et 0.019 mois et 0. (0.0033 mois pour le compartiment amont) ce qui dénote que la zone noyée de l'aquifère karstique du compartiment aval est significativement plus inertielle que dans le compartiment amont.

Le coefficient d'emménagement équivalent de la nappe est faible (0.0033 à 0.098) et caractéristique d'un aquifère captif, ce qui est cohérent puisque l'aquifère est globalement sous couverture Miocène dans le compartiment aval.

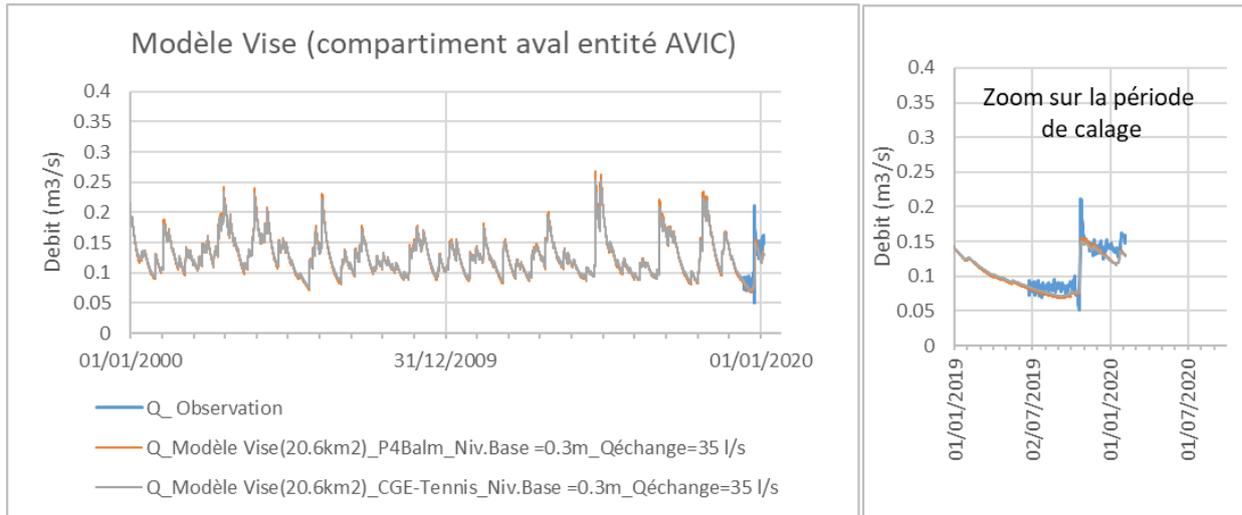


Figure 22 : Évolution des débits observés et simulés par les modèles GARDENIA « Vise ».

		Remarque paramètre	Modèle Vise P4 LaBalm	Modèle Vise CGE-Tennis
Débit extér=	m³/s	Fixé	3.50E-02	3.50E-02
Flux amont	m³/a		1 103 760	1 103 760
Superficie	km²	Fixé	20.6	20.6
Niv. Base	m	Fixé	0.3	0.3
Coef Emmag	%		9.81E-03	3.32E-03
Rui Perco	mm		92.3	102.2
T1/2 Perco	mois		7.96	8.91
T1/2 Taris1	mois		1.92E-02	1.31E-02
Nash_Q			0.47	0.48
Nash_H			0.71	0.72
Nash Global			0.58	0.59
R Global			0.76	0.77

Figure 23 : Paramètres et critères d'ajustement du modèle Vise.

À titre d'information, le bilan moyen des modèles sur la période 2000-2020 indiquerait que la recharge moyenne du compartiment aval est de 131 ou 141 mm/an selon le modèle considéré (comprise entre 94 ou 103 mm et 168 ou 179 mm). Le flux moyen de la Vise serait de l'ordre de 0,127 m³/s (4 millions de m³/a), la variabilité interannuelle apparaît assez faible (Min= 0,1 m³/s, Max =0,15 m³/s) soit entre 3,2 et 4,8 millions de m³/a. En moyenne, le flux en provenance du compartiment amont représenterait environ 30 % du flux total de la Vise.

3.4. MODÉLISATION DES FLUX DES EXUTOIRES SECONDAIRES (CAUVY, AMBRESSAC)

3.4.1. Schéma conceptuel, données utilisées et stratégie de calibration

Le schéma conceptuel adopté pour décrire le fonctionnement des sources de Cauvy et d'Ambressac est celui présenté sur la Figure 13.

Les données journalières d'évapotranspiration potentielle et de précipitation sont celles précédemment déterminées pour le modèle de la Vise.

Les surfaces des impluviums des sources n'ont pas été fixées contrairement au niveau de base locaux de l'aquifère (Figure A- 15). Pour la source Cauvy, les débits de prélèvement AEP dans la vasque de la source ont été pris en considération.

3.4.2. Résultats

Les résultats des simulations sont présentés en annexe (Figure A- 13 et Figure A- 14). Les débits de la source de Cauvy sont reproduits de manière jugée satisfaisante, les résultats de la source d'Ambressac sont présentés de manière indicative, la chronique d'observation apparaît trop courte pour le calage de modèle.

Les débits moyens estimés par modélisation (période 2010/2020) seraient de l'ordre de 0,006 m³/s et 0,004 m³/s respectivement pour Cauvy et Ambressac, soit 0,19 millions m³/a et 0,13 millions de m³/a, respectivement. En moyenne, les flux cumulés des exutoires de Cauvy et Ambressac représenteraient moins de 10 % des flux moyens de la source de la Vise.

3.5. SYNTHÈSE

L'étude du fonctionnement hydrogéologique de l'entité A.V.I.C. à l'aide de l'approche de modélisation globale (logiciel GARDENIA) a permis d'une part, de qualifier le fonctionnement hydrogéologique du système karstique développé au sein du Jurassique et d'autre part, d'établir des bilans hydrogéologiques au sein des compartiments identifiés du système hydrogéologique.

La source d'Issanka est l'exutoire principal du compartiment amont de l'aquifère dont l'impluvium de recharge est situé sur le causse d'Aumelas et la montagne de la Moure. Les sources temporaires de la Vène (à Cournensec) et des Oulettes (à Montbazin) constituent les exutoires temporaires de trop plein du système karstique, ils s'activent exceptionnellement suite aux épisodes pluvieux majeurs (>100 mm). Ces écoulements contribuent à l'écoulement de la Vène dont les écoulements naturalisés ont été reconstitués puis modélisés dans le cadre de cette étude. L'impluvium de la station hydrologique situé à l'aval d'Issanka qui a été utilisée pour la naturalisation des écoulements est de 135,6 km².

Le schéma adopté pour la modélisation des flux naturalisés issus du compartiment karstique amont de l'entité A.V.I.C. repose sur un réservoir caractérisé par deux exutoires séparés par un seuil, le premier exutoire permet de représenter le fonctionnement des trop-pleins du karst (trop-plein de la Vène à Cournensec, trop-plein des Oulettes à Montbazin), le second exutoire permet de caractériser le fonctionnement de la source d'Issanka. Dans le schéma de modélisation, la possibilité d'un débit de fuite au profit du compartiment aval drainé par la Vise principalement a été autorisé dans le modèle.

La recharge sur le causse d'Aumelas et la montagne de la Moure du compartiment amont a été évaluée à 152,8 mm/a en moyenne [7,5 millions de m³/a] ; les flux du karst qui alimentent la Vène représente en moyenne 130,6 mm/a [6,4 millions de m³/a], le flux d'échange au profit du compartiment aval est évalué à 22,3 mm/a [1,1 millions de m³/a]. La comparaison de l'évolution temporelle du flux d'échange au profit du compartiment aval avec la piézométrie mesurée aux ouvrages CGE-Tennis (BSS002JEHM) et P4-La Balm (BSS002JEKE) permet de montrer de manière très démonstrative le lien hydraulique entre les compartiments amont et aval, les évolutions mesurées dans le compartiment aval (presqu'île de Balaruc) apparaissent fortement corrélées aux flux d'échange issus du compartiment amont. La contribution du compartiment amont est importante en période de hautes eaux (de l'ordre de 150 l/s) et apparaît globalement faible en période de très basses eaux (<30 l/s).

La modélisation des débits de la Vise mesurés dans cette étude avant l'inversac (26 juin 2019 au 27 novembre 2020) a été réalisée à l'aide d'un modèle GARDENIA permettant la prise en compte d'un flux externe constant (flux constant moyen de 0,035 m³/s [1,1 millions de m³/a]) en provenance du compartiment amont. L'effet des pompages connus de la presqu'île (<100 m³/h, soit 0,028 m³/s) n'a pas été pris en considération dans la modélisation, la chronique de débit de la Vise étant trop courte pour étudier l'effet/l'influence des pompages. Les premiers résultats permettent d'établir de premier ordre de grandeur du bilan hydrogéologique pour le compartiment aval. À titre d'information, la recharge moyenne du compartiment aval serait comprise entre de 131 et 141 mm/an selon le modèle considéré, l'impluvium estimé est de 20,6 km². Le flux moyen de la Vise serait de l'ordre de 0,127 m³/s (4 millions de m³/a), la variabilité interannuelle apparaît assez faible (Min= 0,1 m³/s, Max =0,15 m³/s) soit entre 3,2 et 4,8 millions de m³/a. En moyenne, le flux en provenance du compartiment représenterait environ 30 % du flux total de la Vise. Les flux des exutoires secondaires du compartiment aval (sources de Cauvy et d'Ambressac), représenteraient moins de 10 % des flux moyens de la source de la Vise.

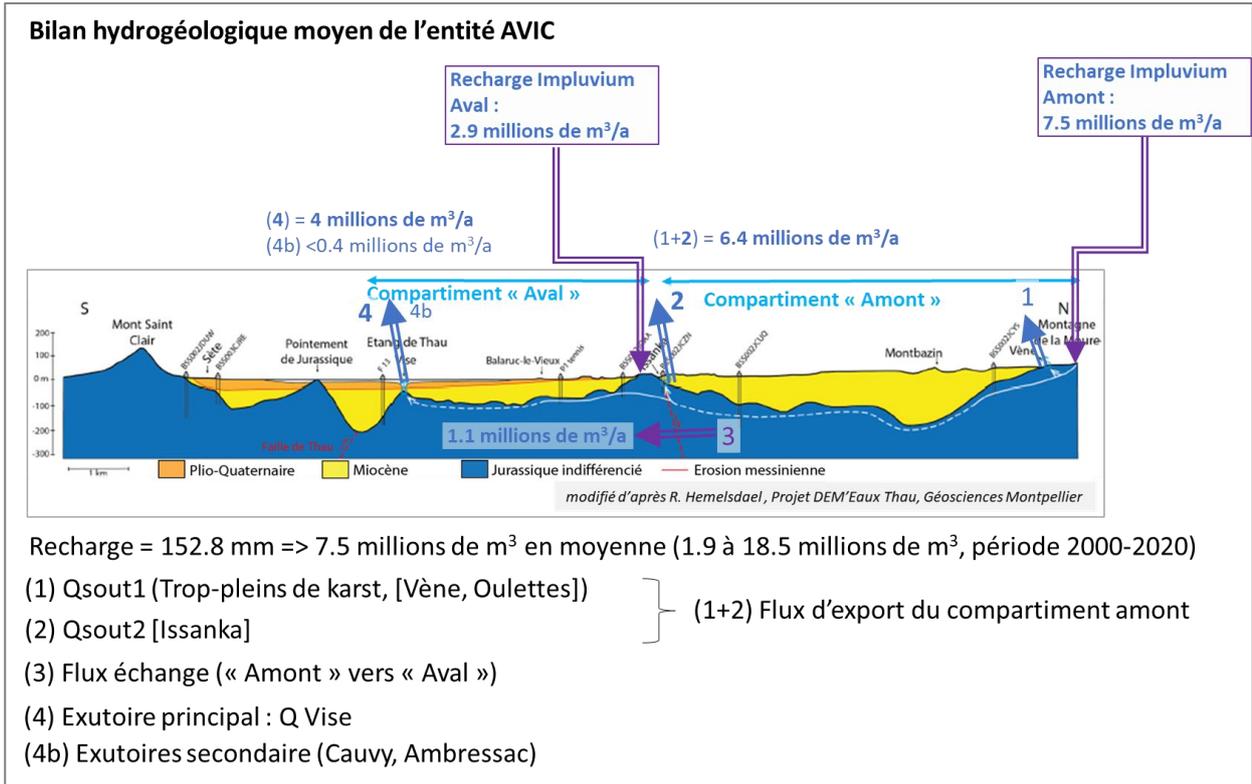


Figure 24 : Bilan hydrogéologique du système karstique de l'entité A.V.I.C.

4. Modèle déterministe avec l'outil MARTHE

Ce chapitre présente l'approche de modélisation déterministe des écoulements au sein de l'hydrosystème à l'échelle régionale. Cette modélisation se base sur de nombreuses données (Figure 25) qui alimentent le modèle conceptuel et l'outil numérique en lui-même. La modélisation mise en œuvre ici constitue une avancée vers un outil robuste de gestion et de prédiction du comportement de l'aquifère sous différents forçages externes.

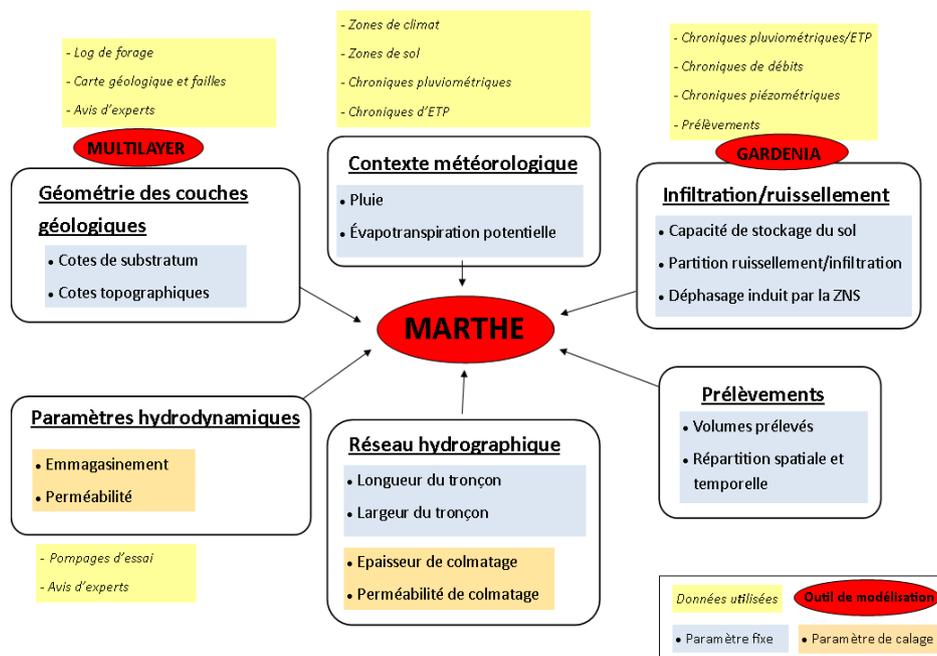


Figure 25 : Aperçu des données et paramètres utilisés lors d'une modélisation avec l'outil MARTHE (Thiéry, 1990).

4.1. PRÉSENTATION DE L'APPROCHE DE MODÉLISATION DÉTERMINISTE

Cette section présente une approche de modélisation différente à celle, globale, proposée précédemment. L'outil de modélisation mis en œuvre s'intitule **MARTHE** : **M**odélisation d'**A**quifères par un maillage **R**ectangulaire en régime **T**ransitoire pour le calcul **H**ydrodynamique des **E**coulements. L'outil est développé par le BRGM (Thiéry, 2015), il permet de modéliser les hydrosystèmes en intégrant, de manière couplée, les écoulements souterrains, le bilan hydroclimatique et les écoulements en rivières ; avec une discrétisation spatiale tridimensionnelle.

À la différence de l'approche globale développée ci-dessus (§.3), l'approche de modélisation déterministe permet de simuler des écoulements dans un ensemble de mailles, selon des principes physiques (p. ex. : conservation de la masse, loi de Darcy pour les écoulements en milieu poreux). Ce type d'approche déterministe permet de prendre en compte des distributions spatiales, possiblement hétérogènes, de la recharge, des propriétés hydrauliques dans des couches au sein desquelles des écoulements prennent place.

L'outil de modélisation utilise un schéma de calcul à volumes finis avec un maillage parallélépipédique irrégulier. Ainsi, il permet de représenter des systèmes complexes multicouches : disparition locale de couche et présence de surfaces libres en n'importe quelle couche. Le lecteur trouvera plus de détails technique dans le rapport (Thiéry, 2015) qui présente les fonctionnalités de l'outil.

Dans le cadre du projet Dem'Eaux Thau, cet outil de modélisation est utilisé pour simuler les écoulements dans l'aquifère des calcaires du Jurassique à l'échelle régionale, en tenant compte des nouvelles interprétations géologiques.

4.2. IMPORTATION DU MODÈLE GÉOLOGIQUE

Les interprétations des structures géologiques de la zone d'étude ont été révisées et précisées dans le cadre du projet Dem'Eaux Thau, permettant ainsi d'obtenir un nouveau modèle géologique 3D (Hemelsdael *et al.*, 2021). La Figure 26 présente une coupe illustrative issue de ce modèle, y figurent en particulier la faille de Thau nouvellement identifiée et les principaux chevauchements.

Les structures orientées sud-est/nord-ouest et les failles orientées nord-sud superposent et décalent les séries du Jurassique supérieur et moyen (bleu ciel et bleu clair). Elles jouent un rôle majeur sur les écoulements régionaux. En effet, elles compartiment l'aquifère et les transferts sont contraints aux limites sud et nord de l'hydrosystème (aval à Sète et amont au causse d'Aumelas).

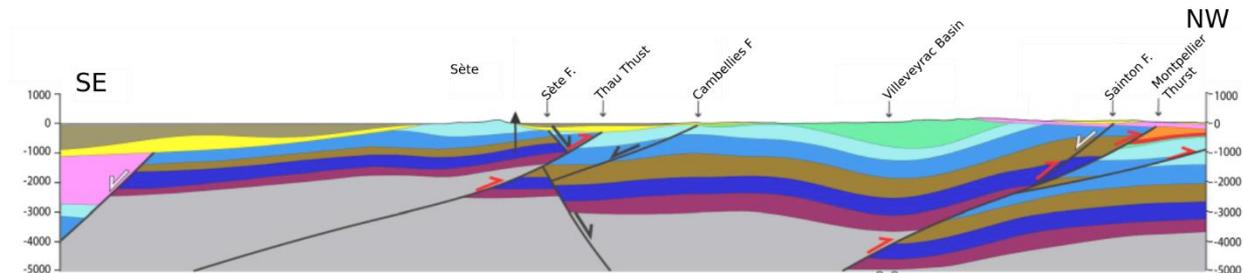


Figure 26 : Coupe géologique illustrant les différentes couches retenues dans le modèle géologique 3D (Hemelsdael *et al.*, 2021). Le nouveau modèle présente une nouvelle faille chevauchante au niveau de Thau qui sépare des compartiments « amont », vers le nord et « aval » vers le sud.

Le modèle géologique a été exporté afin d'être utilisé dans l'outil de modélisation hydrogéologique MARTHE. La Figure 27 présente le log-lithostratigraphique issu du modèle géologique régional et les couches utilisées dans le modèle distribué hydrogéologique. L'export a nécessité plusieurs étapes :

1. regrouper les séries géologiques en fonction des propriétés hydrogéologiques ;
2. définir une numérotation des couches qui tient compte des chevauchements et des caractéristiques des écoulements ;
3. définir une grille d'exportation à l'échelle régionale.

Le regroupement des séries géologiques considère que seules les interfaces et les épaisseurs associées au Jurassique supérieur et moyen sont liés à l'aquifère karstique. Les autres aquifères de moindre importance (p. ex. dans les couches sus-jacentes dans le bassin de Montbazin Gigean) ne sont pas représentés actuellement. Dans le karst, les écoulements sont distribués dans deux couches, ce qui permet de distinguer des champs de pression et des flux superficiels et profonds (jusqu'à -2 000 m sur l'entité A.V.I.C.).

Écoulement	Couche MARTHAU	Surface modèle géologique	Stratigraphie	Étage	Épaisseurs	Lithologie
Imperm.			Quaternaire	Alluvions récentes	2	Limons et sables
				Alluvions anciennes	2	Brèche et coquillier
				IV ancien	30	Calcaire lacustre, argile rouge, cailloutis
	2	Surface Messinienne	Tertiaire	Pliocène	50	Sable et limons, conglomérat
				Pliocène marin	100	Argile
	3	Miocène		Miocène	60	Marne, molasse, sable
	4	Oligocène Aquitainien		Oligocène	190-500	Conglomérat, grès argile, calcaire lacustre
	5	Eocène		Eocène	<455	Conglomérat et calcaire lacustre
	6	Vitrollien	Crétacé sup.	Bégudo-Rognacien sup.	75	Conglomérat, grès, argile, calcaire lacustre
				Bégudo-Rognacien inf.	800	Grès, argile, calcaire lacustre
4 et 7	Crétacé terminal	Crétacé moy.	Campanien sup.	200	Argile	
			Campanien inf.	10	Grès, argile, calcaire lacustre	
			Bauxite	4	Argiles alumineuses	
Aquifère	5 et 8	Malm	Malm	Tithonien	150	Calcaire, dolomie
				Kimméridgien sup.	85	Calcaire, dolomie
				Kimméridgien inf.	100	Calcaire argileux
				Oxfordien sup. et moyen	170	Séquence de comblement calcaire
				Oxfordien inf.	20	Marne, calcaire argileux
Aquifère	6 et 9	Dogger	Dogger	Callovien	<340	Séquence de comblement calcaire
				Bathonien sup.	100	Marne
				Bathonien inf.	200	Calcaire
				Bajocien	200	Calcaire siliceux
				Aalénien sup.	100	1/2 sup. calcaire
Imperm.	10	Lias marneux	Lias marneux	Aalénien inf.	100	1/2 inf. marne
				Domérien à Toarcien	600	Marne
				Carixien	<100	Calcaire argileux et siliceux
	11	Lias calcaire	Lias calcaire	Sinémurien	<100	Calcaire argileux
				Hettangien	250	Dolomie et évaporite
12	Trias	Trias	Trias et Rhétien	200	Grès argile dolomie et évaporites	
-	Socle	Socle			Schistes à pinnite (la Gardiole)	

Figure 27 : Log-lithostratigraphique utilisé dans le modèle géologique 3D et détails des couches associées et regroupées dans le modèle distribué MARTHAU.

La définition des numéros de couches et leur répartition spatiale ont constitué un défi technique pour ce projet. Ce défi a pour origine la combinaison (i) du manque d'information à propos des propriétés de *hanging wall* et de *footwall*⁸ associées aux chevauchements dans le modèle géologique et (ii) du besoin de différenciation des couches dans l'outil de modélisation hydrogéologique (impossibilité d'avoir une couche de même numéro à de multiples profondeurs sur une même maille). À noter que sur certains chevauchements, p. ex. au niveau du chevauchement de Montpellier (Figure 26), les couches jurassiques sont triplées en profondeur.

Dans ce cadre, la stratégie adoptée a été de débiter la numérotation des couches à partir du premier compartiment « aval », au sud du premier chevauchement majeur (Thau). La numérotation des couches « doublées » dans ce chevauchement est poursuivie avec les mêmes numéros de couches présentes dans la partie nord du chevauchement. Dans la partie nord, le chevauchement de Montpellier a été considéré comme imperméable. Le domaine de simulation s'arrête à l'extrémité nord du causse d'Aumelas. Cette limite réduit le nombre de couches complémentaires à considérer dans le modèle afin d'augmenter ses performances. En résumé, la numérotation spécifique des couches est donnée sur la Figure 27 : le modèle hydrogéologique déterministe contient deux couches aquifères (Malm et Dogger, réparties sur quatre couches de calcul) couvertes localement par deux épontes qui sont réparties au sud et au nord du chevauchement de Thau.

⁸ *Hanging wall* et *footwall* représentent respectivement les parties supérieures et inférieures des couches géologiques séparées par un plan de faille.

Enfin, la discrétisation spatiale de la grille de simulation a été définie avec un carré de côté de 400 m. L'étendue du domaine de simulation contient 66 colonnes et 96 lignes, avec un total de 12 211 mailles de simulation. Plus de statistiques relatives à l'épaisseur des mailles sont données en Annexe 3. Le choix de la dimension des mailles résulte d'un compromis fait entre le nombre de mailles incluses dans le modèle (capacité d'ajustement / vérification manuelle des géométries) et la finesse de la résolution spatiale. La géométrie de chaque couche a été vérifiée sur l'intégralité du territoire. Enfin, pour exemple, la Figure 28 présente l'altitude du substratum pour la couche 8 du modèle qui correspond au Jurassique Supérieur dans la partie amont au chevauchement de Thau. On voit sur cette figure, l'approfondissement de la couche vers l'ouest sous le bassin de Villeveyrac et les variations d'épaisseurs sur l'axe Vène – Issanka – Cauvy (croix rouges respectivement numérotées 7, 36 et 5 sur la figure) et sur le pourtour nord de l'étang de Thau.

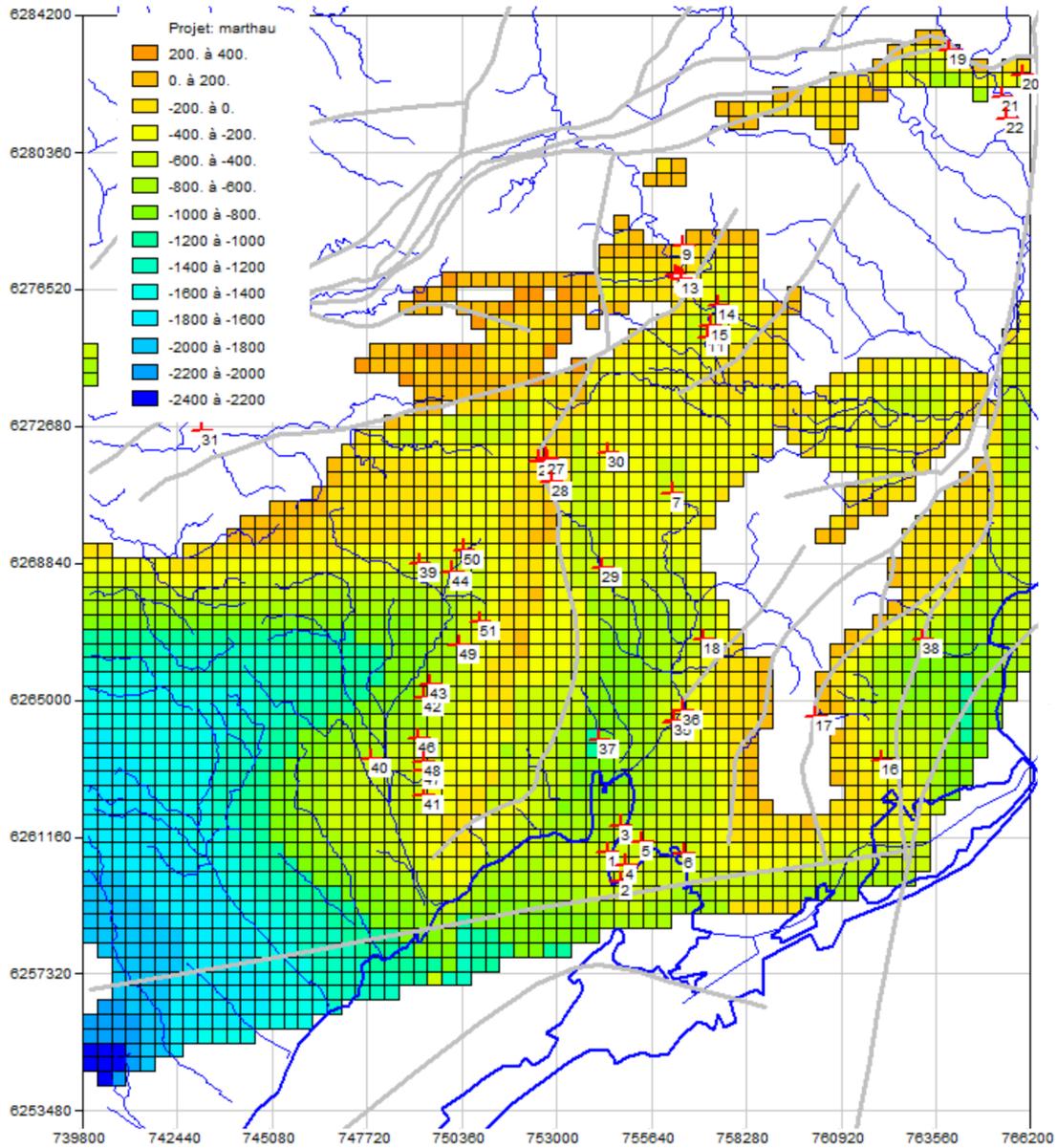


Figure 28 : Représentation de la profondeur du substratum sur la couche 8 (Jurassique Supérieur, partie amont de la faille de Thau) du modèle MARTHE. Les croix rouges indiquent les principales sources du territoire. Les lignes grises indiquent les accidents tectoniques régionaux.

4.3. DOMAINE DE MODÉLISATION, CONDITIONS AUX LIMITES, RECHARGE ET PRÉLÈVEMENTS

4.3.1. Étendue du domaine de modélisation

L'ensemble du domaine de modélisation est présenté sur la Figure 29. L'intégralité du domaine de modélisation représente un rectangle de 66 colonnes et 96 lignes. Les couches sont au nombre de 13, elles sont regroupées dans des ensembles : couches 1-4 éponte imperméable, couches 5 et 6 aquifères au sud du chevauchement de Thau, couches 7 éponte imperméable, couches 7 et 8 aquifères au nord du chevauchement de Thau, et couches 9-13 éponte imperméable (substratum).

La représentation du domaine de modélisation permet de mettre en évidence les différentes lithologies associées aux couches de l'aquifère. Le chevauchement de Thau est identifiable par le changement de couleur des formations imperméables affleurantes. Au sud, les formations imperméables sont en gris, elles s'étendent principalement sur le fond marin et en partie dans l'étang de Thau (au nord du Mont Saint-Clair). Au nord, les formations imperméables sont en orange. Elles sont présentes dans le long du trait de côte et dans les grands bassins de Villeveyrac à l'est et de Montbazin Gigean à l'ouest.

Les couches représentant les calcaires du Jurassique supérieur et moyen sont respectivement représentées en cyan et bleu foncé, à l'affleurement et sous couverture.

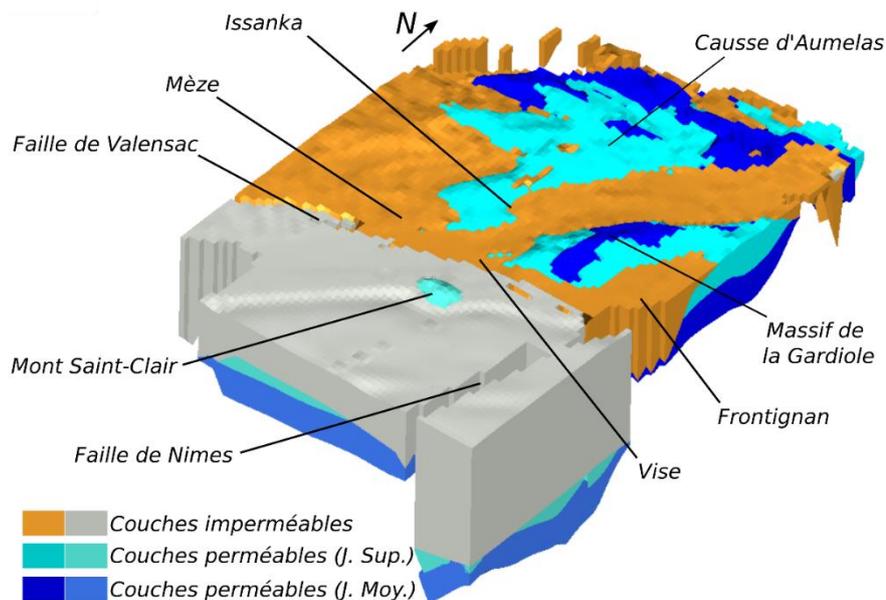


Figure 29 : Vue d'ensemble 3D du modèle hydrogéologique de l'aquifère associé à la source de la Vise.

4.3.2. Conditions aux limites

Sur le domaine, les conditions aux limites sont réparties ainsi :

- conditions de flux nul sur l'ensemble des faces des mailles extrêmes à l'ouest, au nord et à l'est, comme dans le modèle historique de 1988 (Auriol *et al.*, 1988). Dans la partie nord, le chevauchement de Montpellier et la série d'écaillés avec une géométrie qui découpe l'aquifère, suggèrent que les flux venant de l'amont peuvent être dans un premier temps négligés. Sur les parties latérales, à l'ouest et à l'est, une condition de charge pourrait être utilisée avec des valeurs de piézométries informatives de l'état des charges selon deux transects nord-sud. Actuellement ces informations ne sont pas disponibles et les flux sont mal connus. Dans ce contexte, une condition à la limite à flux nul est appliquée aux limites latérales du modèle ;
- conditions de charge imposée à 0 sur les couches qui affleurent dans l'étang de Thau et en Méditerranée qui correspondent à la charge imposée par l'étang et la mer localement ;
- condition de charge imposée à 0,8 m sur la maille située au droit de la source de la Vise. Cette condition est différente de la seconde mentionnée ci-dessus en lien avec la mer. La valeur de 0,8 m correspond à la charge imposée par une colonne d'eau salée en équivalent d'eau douce⁹. La densité de l'eau de mer n'est pas prise en compte dans les calculs actuels et cette valeur de charge est un substitut pour représenter la pression induite par la colonne d'eau de l'étang au-dessus de la source de la Vise. Sur l'ouvrage DEMT1, très proche de la source de la Vise, la piézométrie hors inversac est stable, impactée par la dynamique de l'étang et de l'ordre de 0,9 m NGF (Ladouche *et al.*, 2022a).

Dans l'ensemble, les conditions aux limites sont appliquées à des distances importantes de l'entité « Aumelas-Vène-Issanka-Cauvy ». Ceci permet de diminuer l'effet des limites sur les calculs réalisés sur l'entité. Néanmoins, la condition de charge imposée au niveau de la Vise contraint la pression comme le fait l'eau saumâtre à la Vise. La condition permet de calculer un débit variable : positif si l'eau de l'étang entre dans l'aquifère ou négatif si l'aquifère alimente l'étang. L'intégration des variations temporelles du niveau de l'étang est possible et constitue une perspective au travail réalisé.

La présence de sources de débordement est prise en compte dans le modèle. La Figure 29 montre l'emplacement des principales sources prises en compte dans le modèle. Dans le cas où une couche éponte est présente au-dessus des couches aquifères, une valeur de conductivité hydraulique est attribuée à la couche éponte ; ceci permet à l'éponte d'être localement perméable. En cas d'absence de couche éponte, la maille affleurante de couche aquifère peut « déborder ». Dans l'outil de modélisation MARTHE, le débordement d'une maille affleurante est actif dès lors que la charge dans la maille est supérieure à la cote topographique. Dans cette version du modèle, le routage du débit produit en surface est extrait du domaine de calcul, sans être attribué à un réseau hydrographique (l'option d'alimentation de cours d'eau peut néanmoins être intégrée au besoin).

⁹ À 20 °C, la charge hydraulique totale en équivalent d'eau douce appliquée par une colonne d'eau salée de 30 m est donnée par $\psi_T = \frac{\rho_s h_s}{\rho_f} + z$ (avec ρ_s , ρ_f , h_s , et z la densité de l'eau de mer, de l'eau douce, la charge et l'altitude à laquelle est mesurée la charge), soit numériquement : $\psi_T = \frac{1025 \cdot 30}{998,21} + (-30) = 0.80\text{m}$.

4.3.3. Recharge

Sur le domaine de modélisation, une recharge diffuse s'applique aux mailles aquifères (calcaires du Jurassique) qui affleurent. Les processus d'infiltration concentrée via les pertes (p. ex Coulazou) ne sont pas considérés. De manière similaire au calcul réalisé précédemment pour l'approche de modélisation globale avec GARDENIA, les données journalières d'évapotranspiration potentielle (ETP) et de précipitation sont issues d'une pondération surfacique des données Météo-France des mailles SAFRAN. La surface des affleurements de calcaire est de 118 km² (742 mailles du modèle). Les surfaces affleurantes sont divisées en trois zones (nord, sud et est – Figure 30) ce qui permet d'appliquer des champs de recharge hétérogènes (par zone).

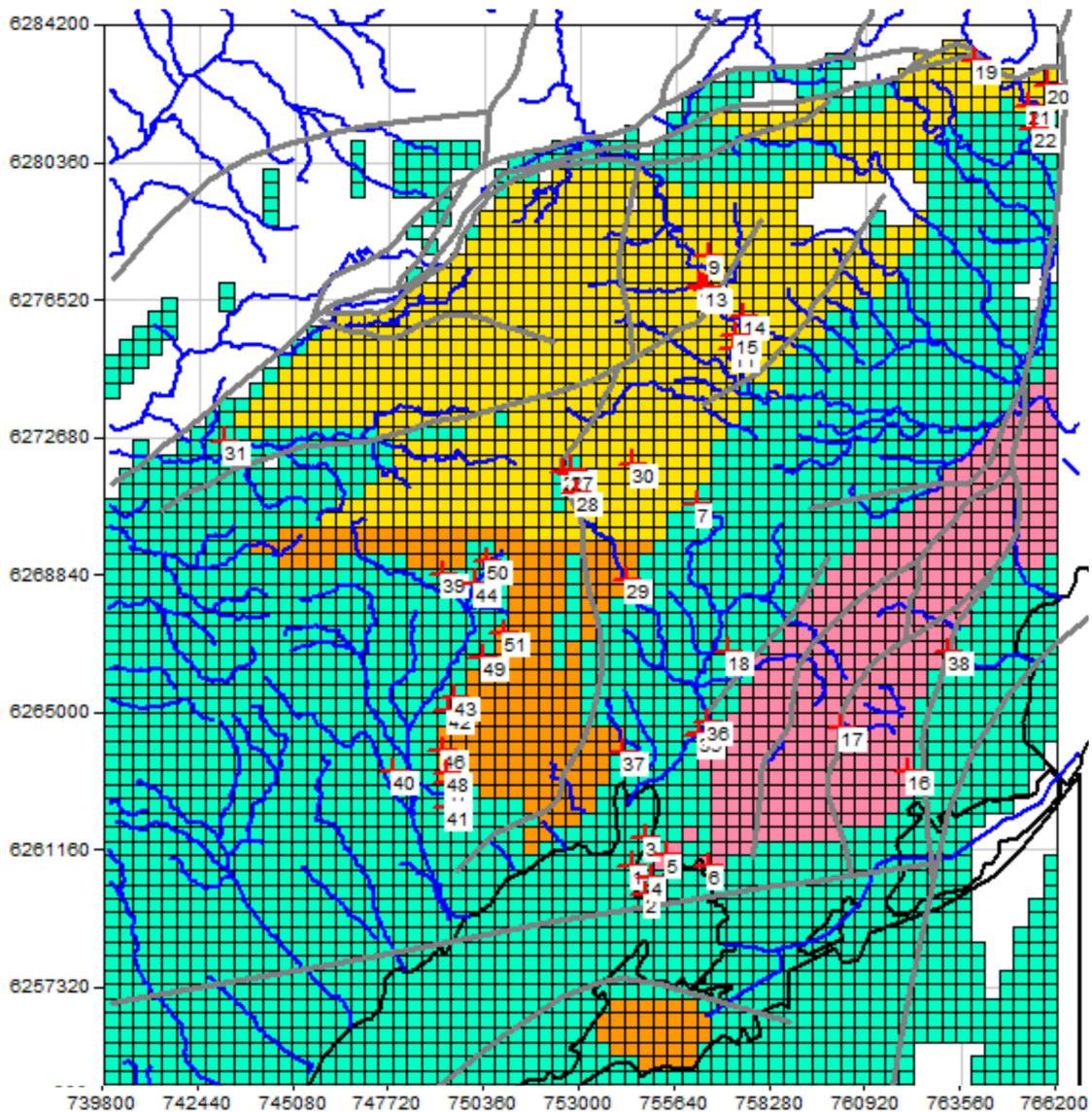


Figure 30 : Carte des trois zones de recharge considérées dans le modèle d'écoulement distribué : Zone 1 en jaune au nord, Zone 2 en orange au sud et Zone 3 en rose à l'est. Les croix rouges indiquent les principales sources de l'hydrosystème.

Les pondérations utilisées pour la pluie (PI) et l'ETP sont :

PI ou ETP – Zone 1 (nord) :
 $= 10.3\% * 8855 + 10.5\% * 8856 + 21.2\% * 8943 + 51.3\% * 8944 + 6.7\% * 8945$

PI ou ETP – Zone 2 (sud) :
 $= 62.8\% * 9032 + 20.3\% * 9031 + 16.9\% * 9118$

PI ou ETP – Zone 3 (est) :
 $= 10.5\% * 9032 + 2.8\% * 9118 + 3.2\% * 8946 + 60.8\% * 9033 + 0.2\% * 9034 + 0.9\% * 9119 + 21.6\% * 8945$

Les cumuls journaliers sont utilisés pour déterminer des cumuls de pluie efficace (PE) par la méthode de Thornthwaite. La valeur de réserve utile (RFU) considérée est de 100 mm, afin d'avoir des modalités de recharge comparables au modèle MARTHE développé antérieurement (Auriol *et al.*, 1988). Les valeurs de pluie efficace sont ensuite utilisées pour déterminer la recharge :

Recharge = $80\% * PE$.

Ce calcul de recharge est justifié par l'hypothèse de ruissellement extrêmement faible sur les surfaces où les calcaires affleurent. L'amélioration de la connaissance sur l'importance du facteur de ruissellement de la zone d'étude constitue une piste d'amélioration du modèle

La Figure 31 présente les cumuls de recharge annuels appliqués sur l'intégralité des affleurements carbonatés du territoire (somme des trois zones définies ci-dessus – Figure 29) pour la période 1988-2020. Sur l'intégralité de la surface des calcaires à l'affleurement, la moyenne interannuelle de la recharge est de 329 mm (médiane de 251 mm). Cette moyenne est plus importante que celles déterminées pour les recharges des compartiments amont et aval de l'entité AVIC (resp. 153 mm/an et 131-141 mm/an) via l'outil GARDENIA (sections 3.2.4 et 3.3.4). La somme des moyennes (294 mm) des compartiments est du même ordre de grandeur que celle déterminée ici.

Les calculs montrent des périodes de recharge intenses ou nulles relativement rares : p. ex. pour les intenses 1993, 94 et 96 et pour les nulles 1989, 1998 et 2007. Ces périodes illustrent la forte variabilité interannuelle de la recharge sur le territoire.

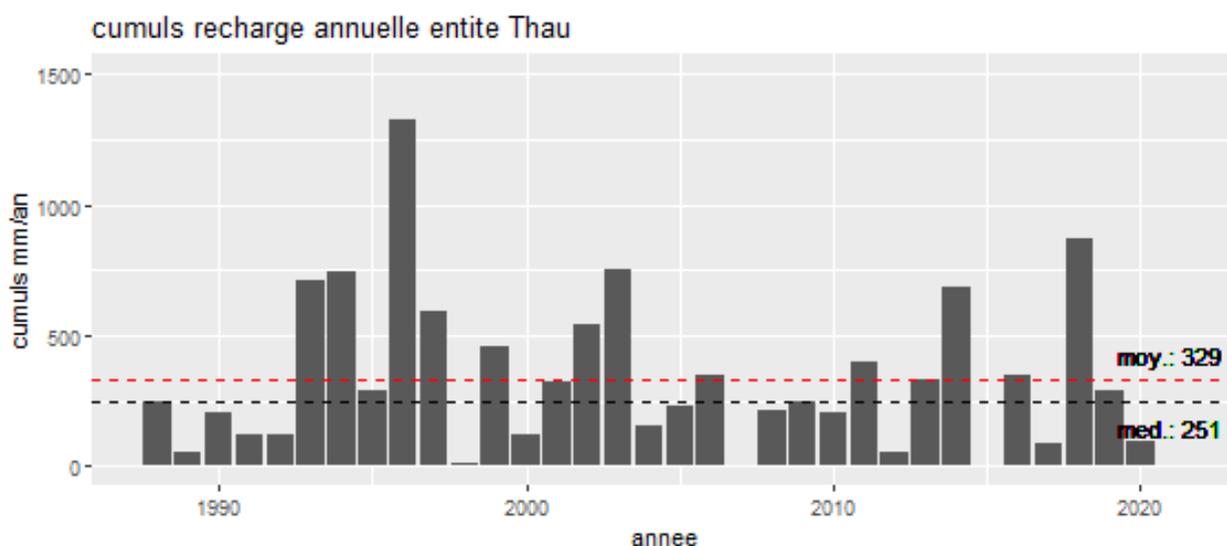


Figure 31 : Cumuls de recharge annuelle appliqués sur les surfaces affleurantes des calcaires du Jurassique dans le modèle d'écoulement distribué.

4.3.4. Représentation du réseau hydrographique

Dans cette version du modèle, le réseau hydrographique n'est pas explicitement pris en compte. Ceci est justifié par le fait que sur l'hydrosystème considéré les échanges nappes rivières sont très localisés, sous la forme de pertes (recharge) ou de sources, et les flux sont exportés hors du domaine. Ainsi le routage du débit produit en surface par des mailles débordantes, ou le ruissellement est extrait du modèle. Dit autrement : les calculs de débits de cours d'eau ne sont pas réalisés. L'outil MARTHE permet de réaliser des calculs très avancés de relation nappe/rivière, en tenant compte des profils de profondeurs des rivières notamment (Thiéry, 2015). Néanmoins, dans le cadre de la modélisation de l'hydrosystème associé aux calcaires du Jurassique le schéma conceptuel retenu juge ces échanges comme négligeables, à l'exception des zones d'émergence d'eau souterraines ou de pertes des eaux de surfaces. Les apports par pertes (p. ex. Coulazou) constituent une piste d'amélioration du modèle. Les émergences sont prises en compte par le biais de débordement de mailles.

4.3.5. Prélèvements

a) Démarche générale

Un important travail de synthèse des prélèvements a été réalisé en deux temps pour intégrer les prélèvements dans le modèle distribué. Dans un premier temps, une synthèse des prélèvements pour l'année 1986 a été réalisée à partir d'un inventaire historique (Marchal & Camus, 1986). Cette première approche permet d'avoir un ensemble de valeurs réparties sur le territoire pour réaliser un calcul en régime permanent. L'année 1986 est utilisée pour le calcul en régime permanent car pour cette année, les informations de piézométrie ont été collectées de manière exhaustive sur le territoire. Cet inventaire avait été utilisé par Auriol *et al.* (1988) et Marchal *et al.* (1990) pour les simulations régionales.

Dans un second temps, une synthèse a été réalisée concernant les prélèvements sur la période de temps 1988/01-2021/05. Cette synthèse permet d'avoir un ensemble de valeurs réparties sur le territoire (Figure 32) et dans le temps (pas de temps journalier) pour réaliser des calculs en régime transitoire. La prise en compte des prélèvements individuels privés, notamment sur la presqu'île de Balaruc, constitue une perspective à ce travail.

Le travail de synthèse pour le régime transitoire recense 32 points de prélèvements majeurs implantés dans les calcaires du Jurassique Supérieur (n=23) et Moyen (n=9) (Annexe 5). Ce travail s'est appuyé sur différentes sources d'informations, notamment la Banque Nationale des Prélèvements d'Eau, données de l'Agence de l'Eau, données d'exploitants (p. ex. Thermes de Balaruc, fermiers AEP aux captages d'Issanka, du Flès, Rémy, Touat, mine / irrigation, etc...).

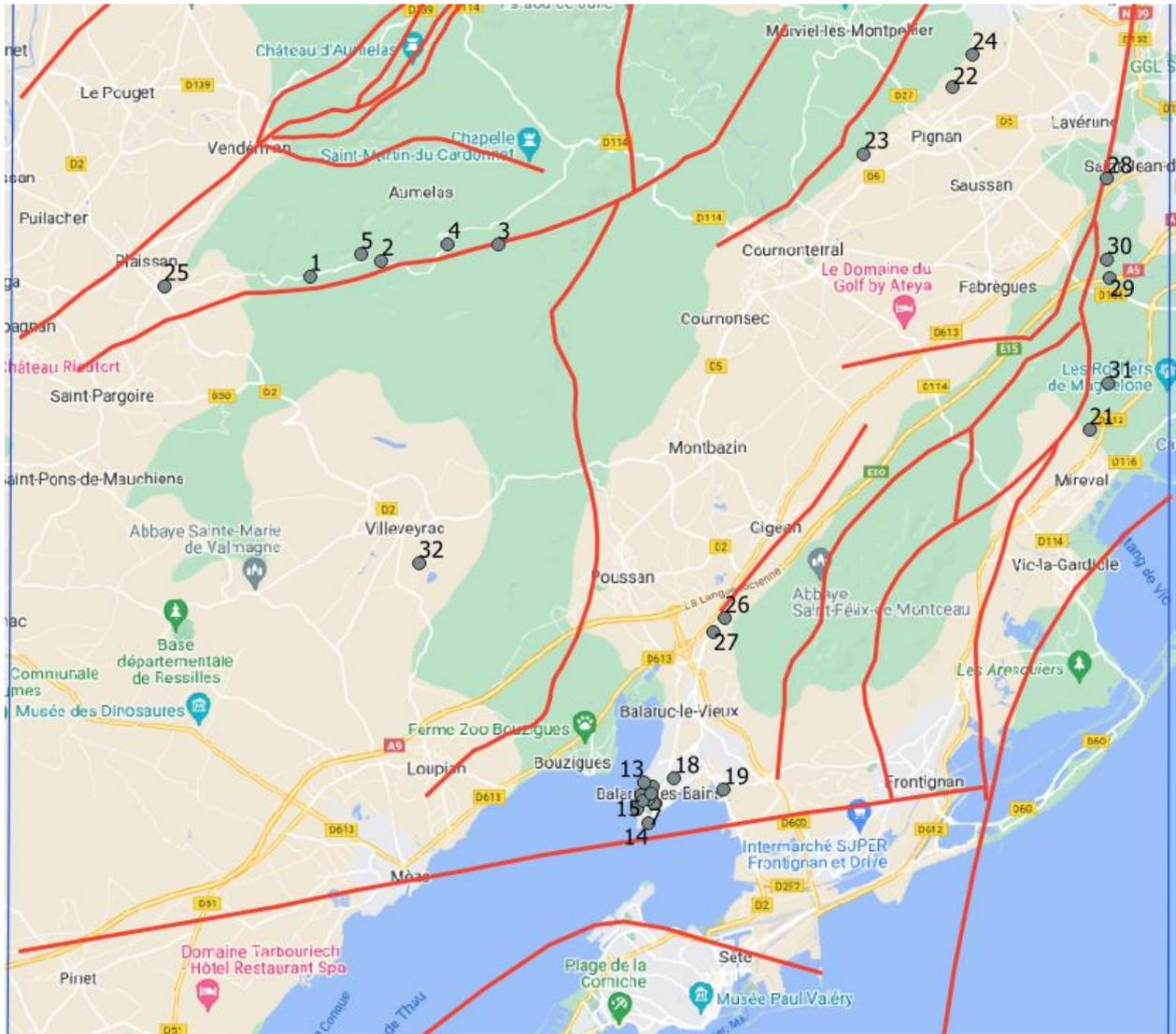


Figure 32 : Aperçu des principaux points de prélèvements considérés dans le modèle MARTHE pour les simulations en régime transitoire (1990-2021). Fond de carte Google.

Les informations disponibles à chaque point de prélèvement ont été examinées et éventuellement adaptées afin d'obtenir une chronique de débit journalier qui tient compte des modalités de prélèvements connus. Ce travail d'expertise a par exemple permis de reconstruire des séries de pompage sur la base de valeur de piézométrie comme expliqué au § 2.2 (pompage F5 à Issanka pour alimenter le débit réservé de la Vène).

b) Exemple et répartition des prélèvements

La Figure 33 présente l'évolution des cumuls annuels prélevés pour le point de prélèvement dans l'ancienne mine de Villeveyrac (BSS002JCLT, point 32 sur la Figure 32). La figure illustre la diminution des prélèvements à Villeveyrac suite à la clôture de la mine et à un usage uniquement agricole (irrigation) à partir de 1994. Néanmoins la résolution annuelle utilisée sur la figure ne rend pas compte des variations du régime de prélèvement : uniforme sur l'année entre 1988-1993, elle est ensuite concentrée sur la période estivale à partir de 1994. Ces variations de régime de prélèvements sont prises en compte dans la modélisation en régime transitoire.

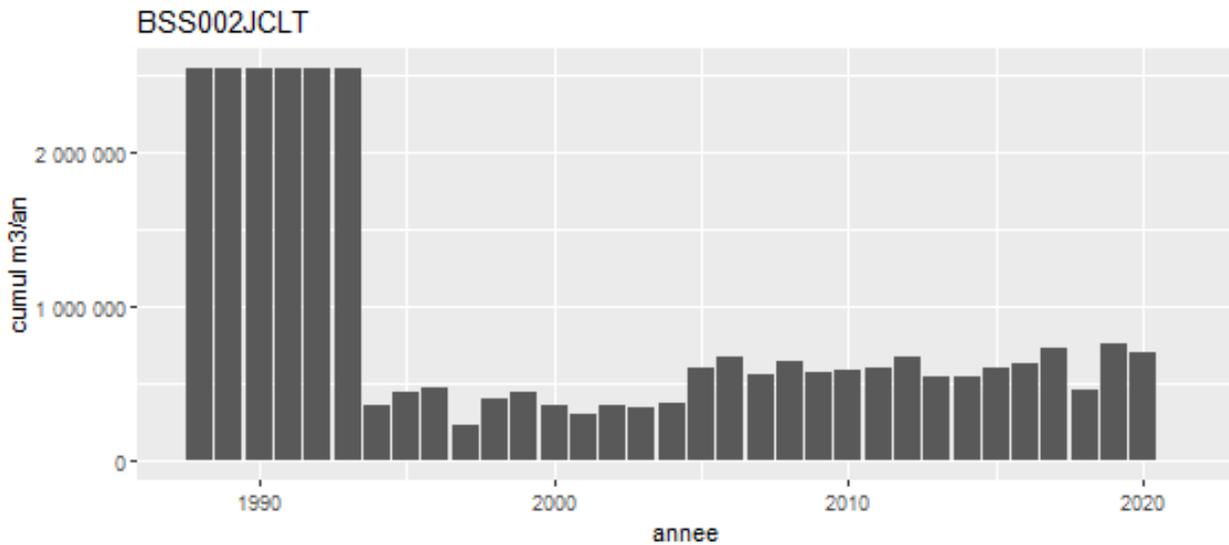


Figure 33 : Évolution des prélèvements à Villeveyrac (BSS002JCLT), exhaure minier et usages agricoles.

En complément, la Figure 34 présente le détail de l'évolution (1988 et 2021/05) des cumuls annuels prélevés a) sur l'intégralité du territoire modélisé (les 32 points de prélèvements), b) les prélèvements de l'entité AVIC et c) la fraction que représentent ces derniers au regard des cumuls intégraux.

À l'échelle du territoire, la Figure 34 (a) montre une série de deux diminutions notables : nette entre 1997 et 2000 et progressive entre 2010 - 2014. Les premières diminutions entre 1997 et 2000 sont liées à la baisse ou l'arrêt des prélèvements à partir de 1996 à Villeveyrac – Saint-Farriol (BSS002JCLT) illustrée sur la Figure 33, Rémy à Villeneuve les Maguelone (BSS002JDDJ), Karland à Mireval (BSS002JDDS), F2, F3, F5 et F4 à Balaruc (BSS002JDXJ et BSS002JDUZ, BSS002JDVA, BSS002JDVB), à Ambressac et S12 à Balaruc (BSS002JEKD et BSS003CJPQ). La seconde diminution des prélèvements identifiable à partir de 2010 et en particulier à partir de 2014 est liée aux diminutions ou à l'arrêt des prélèvements sur les captages de la Lauzette (BSS002GPXF), Cauvy à Balaruc (BSS002JDNJ), F5 à Poussan (Issanka - BSS002JCZA), Fles 1 et 2 à Villeneuve (BSS002JDGR), F8, F6 et F9 à Balaruc (BSS002JDWH, BSS002JDXA et BSS002JDXB).

À l'échelle de l'entité AVIC (Figure 34 b), les cumuls annuels des prélèvements (sur 17 points, voir Annexe 5) montrent une diminution en deux étapes. Les volumes prélevés ont été réduits à partir de 2001, puis progressivement entre 2010-2015. Depuis 2015, les volumes prélevés sont relativement constants et ils sont estimés en moyenne à 491 402 m³/an.

La comparaison des fractions de volumes prélevés sur des ouvrages situés au sein de l'entité AVIC vis-à-vis de ceux à l'échelle du territoire montre une évolution complexe liée à la distribution spatiale des prélèvements (Figure 34 c). Depuis, 1990, la fraction des cumuls prélevés au sein de l'entité AVIC est en baisse. Avant les années 2000, les volumes annuels prélevés sur des ouvrages de l'entité AVIC représentent environ 45 % des prélèvements du territoire. Entre 2000 et 2014, cette fraction diminue à 30-35 % des prélèvements totaux. Depuis 2015, les volumes prélevés sur l'entité mais aussi sur l'intégralité du territoire ont diminué (cf. supra), la fraction des volumes annuels prélevés sur des ouvrages de l'entité AVIC représente environ 20-25 % des volumes totaux.

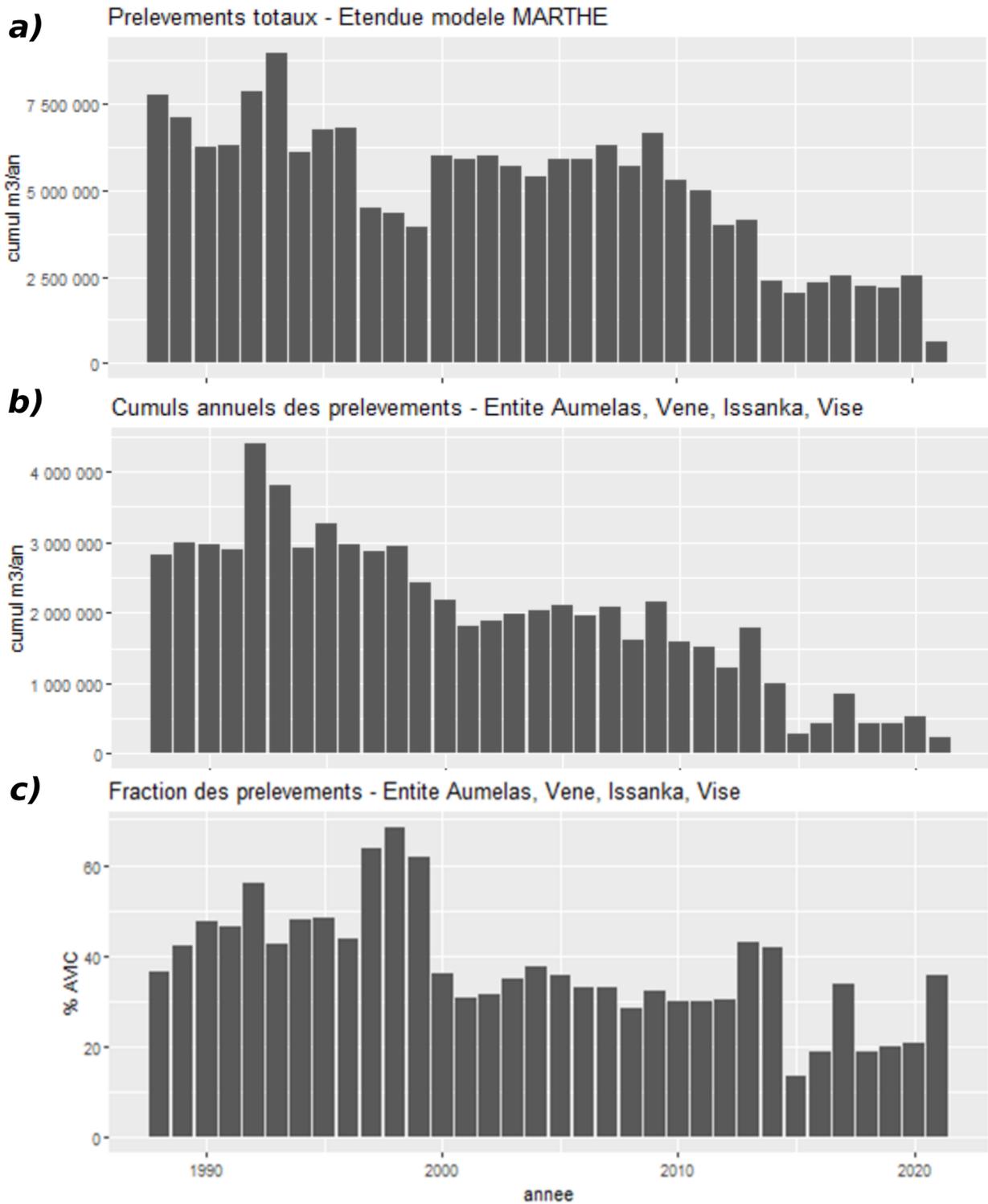


Figure 34 : Comparaison des évolutions des a) cumuls des prélèvements dans l'aquifère karstique associé aux couches du Jurassique Supérieur et Moyen dans l'emprise du modèle distribué, b) cumuls des prélèvements dans l'emprise de l'entité hydrogéologique A.V.I.C. et c) des fractions associés aux cumuls A.V.I.C. vis-à-vis de l'aquifère karstique dans sa globalité.

4.4. RÉGIME PERMANENT

4.4.1. Méthode

La calibration en régime permanent a été réalisée par essai-erreur, avec des ajustements manuels du champ de perméabilité dans des zones des couches aquifères de la partie nord du chevauchement de Thau (couches 8 et 9). Le contrôle de la qualité des ajustements a été réalisé sur la base de :

1. la concordance des isopièzes calculées et interprétées à l'échelle régionale ;
2. la concordance des valeurs de piézométrie mesurées lors de la campagne régionale en 1986 (Marchal & Camus, 1986), sur 48 points dont l'emplacement et la profondeur ont pu être vérifiés. Les détails sur ces points de référence sont donnés en Annexe 3 ;
3. la concordance de la localisation du débordement du modèle aux principales sources.

À noter que le choix de comparer les valeurs de piézométrie observées et calculées a été arrêté vis-à-vis de la quantité d'information contenue dans l'inventaire exhaustif de 1986 (Marchal & Camus, 1986). L'analyse des données de l'inventaire, notamment des positions des points de prélèvement et des aquifères atteints, a permis de sélectionner les 48 points de références présentés. Ainsi, la calibration a été réalisée à partir de ces points et de la piézométrie interprétée.

4.4.2. Résultats

Les résultats de calibration montrent qu'en régime permanent le modèle reproduit de manière satisfaisante la distribution de la piézométrie régionale de basses eaux (août-septembre) interprétée en 1986. La Figure 35 montre une comparaison des valeurs de piézométrie calculée avec celle (a) mesurée dans des ouvrages et (b) interprétée à l'échelle régionale, pour la situation de basses eaux en 1986. La piézométrie calculée est représentée pour la couche 8, qui correspond aux calcaires du Jurassique supérieur dans la partie nord du chevauchement de Thau. Les résultats obtenus dans cette approche en régime permanent apparaissent intéressants sous l'angle « fonctionnel » mais aussi sous l'angle de la précision des résultats.

D'une part, le calcul en régime permanent montre qu'une convergence rapide est atteinte avec des temps de calcul inférieurs à 10 secondes. Cette convergence constitue un premier résultat important compte tenu du contexte de transfert entre les outils de modélisations utilisés (modèles géologique et outil de calcul hydrodynamique) qui a été complexe du fait de la nouvelle géométrie détaillée des couches (avec chevauchements / failles et profondeurs variables associées aux couches et au substratum).

D'autre part, la précision des charges calculées apparaît satisfaisante. En effet, l'erreur quadratique moyenne de l'ensemble des points (sans distinction de couche) est de 12,3 m ($\sigma=10.8\text{m}$). Cette erreur apparaît acceptable compte tenu du contexte karstique et de la représentativité des mesures de niveaux piézométriques ainsi que des incertitudes sur les localisations des mesures effectuées en 1986. Par exemple la carte piézométrique de référence est interprétée sans différenciation de localisation dans le Jurassique Supérieur ou le Jurassique Moyen, ne permettant pas la représentation des flux verticaux. Dans la région de Balaruc, le modèle en régime permanent est capable de reproduire les flux ascendants reconnus sur les forages du démonstrateur DemT1, DemT3 et DemT4 (artésien) – (Ladouche *et al.*, 2022a). La différence de charge calculée en régime permanent entre les deux compartiments est de 0,8 m.

Par ailleurs, la piézométrie régionale interprétée et les calculs du modèle apparaissent cohérents vis-à-vis de la distribution des valeurs de piézométrie sur le territoire. Le travail de calibration a notamment permis d'obtenir la cohérence de la piézométrie calculée au niveau de l'avancée vers le sud des valeurs de piézométrie élevées, au centre du domaine, dans la région de la montagne de la Moure. Et, d'autre part, de reproduire une forme de drainage associée à l'axe nord-sud entre la source de la Vise, Issanka et le trop-plein de la Vène à Cournonsec. Enfin, cette calibration permet d'obtenir une première carte des valeurs de conductivité hydraulique à l'échelle régionale pour les deux couches du modèle. Ces valeurs ont été par la suite précisées et revues dans le cadre de la calibration en régime transitoire qui est présentée ci-après.

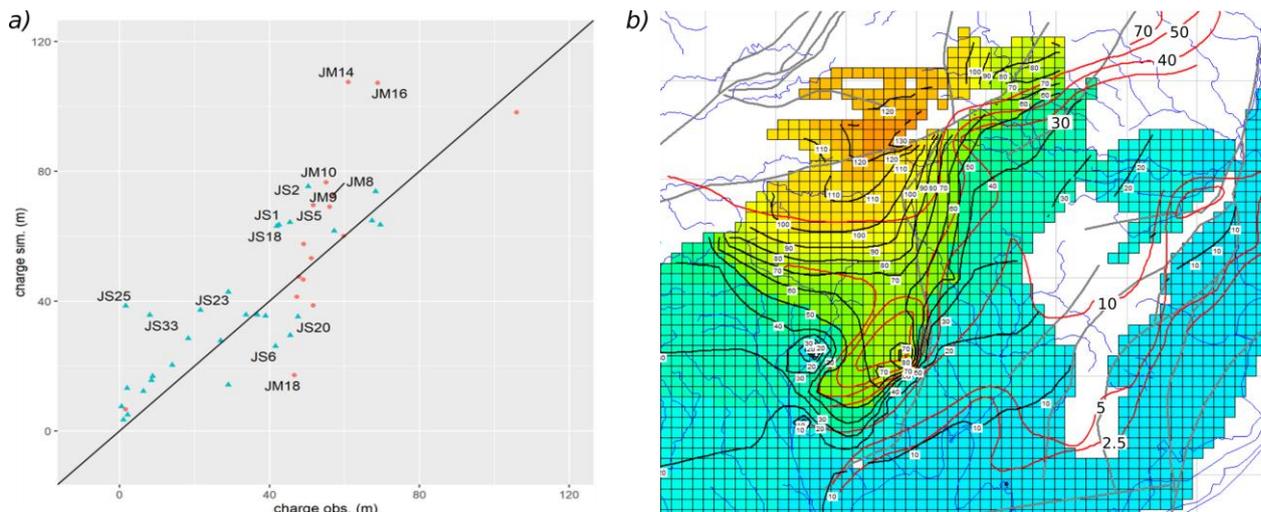


Figure 35 : Comparisons entre valeurs de piézométrie observées et calculées après calibration en régime permanent pour la situation d'étiage (août-septembre) de 1986. a) comparaison des valeurs observées et calculées sur des sites interceptant le Jurassique Supérieur (vert) et le Jurassique Moyen (rouge). Les points nommés indiquent les sites où la différence entre les valeurs observées et calculées est supérieure à 24 m. b) comparaison entre piézométrie régionale interprétée en basses-eaux 1986 (en rouge) et calculée en régime permanent (en noir) dans la couche 8 (Jurassique Supérieur) du modèle MARTHE.

4.5. RÉGIME TRANSITOIRE

4.5.1. Méthode

La calibration en régime transitoire a été réalisée par essai-erreur avec ajustements manuels du champ de perméabilité et des coefficients d'emmagasinement. Ces ajustements ont porté sur les couches aquifères de la partie nord du chevauchement de Thau (couches 8 et 9). Le contrôle de la qualité de l'ajustement a été réalisé sur la base de :

1. la concordance des isopièzes calculées et interprétées à l'échelle régionale, avec une comparaison aux cartes piézométriques hautes eaux et basses eaux établies en 1999 et 2000 (Dörfliker *et al.*, 2001) ;
2. la concordance avec des valeurs de piézométrie enregistrées par des capteurs sur des points de suivis établis sur le territoire. Les localisations et détails des points de suivis sont donnés en Annexe 4 ;
3. la concordance entre les « débordements » et la magnitude des débits de débordement du modèle aux principales sources de l'hydrosystème (notamment La Vise, Issanka, le trop-plein de la Vène, les Oulettes, Roubine de Vic).

Avec l'outil de calcul MARTHE, les résultats obtenus correspondent à une valeur de piézométrie calculée par mois, à la date de fin du mois. Ces valeurs calculées ne sont pas des valeurs moyennes mensuelles. Les résultats peuvent ainsi être comparés aux valeurs observées sur le terrain à la même date. Les résultats présentés ci-dessous montrent les chroniques journalières observées et les chroniques mensuelles calculées. Ces modalités de calcul ne permettent pas de rendre compte de variations piézométriques infra-mensuelles. Pour note, le calcul en régime transitoire au pas de temps mensuel (400 pas de temps pour un calcul de 1988 à 2021) prend environ 20 minutes.

4.5.2. Résultats

a) Carte de perméabilités obtenues

La Figure 36 montre la carte des perméabilités obtenues après calibration pour la couche 8 (couche 9 en Annexe 6) qui correspond au Jurassique Supérieur. Les valeurs de conductivités hydrauliques sont comprises entre $2 \cdot 10^{-8}$ et $1 \cdot 10^{-3}$ m.s⁻¹ dans la couche 8. Dans ce champ hétérogène, les plus fortes valeurs de conductivités hydrauliques sont associées à une zone d'axe nord-sud située au nord de la source de la Vise. Les plus faibles valeurs sont distribuées au sud-ouest de la montagne de la Moure et au droit de Gigean. Ces zones sont relativement morcelées avec des contrastes de perméabilité élevés : par exemple sur l'axe nord-sud situé à l'est de la montagne de la Moure. Localement une telle structure du champ de perméabilité a été requise afin de reproduire la diminution de la charge hydraulique observée depuis la Montagne de la Moure à l'ouest vers le compartiment à l'est (plausiblement en lien avec l'accident d'axe nord-sud) et les faibles charges observées selon l'axe nord-sud dans le compartiment Est qui remontent vers le trop-plein de la Vène. Par ailleurs, d'autres zones sont relativement « homogènes » (p. ex. à l'ouest sous le bassin de Villeveyrac), elles sont généralement liées au peu d'information disponible dans la zone mais aussi au caractère captif de l'aquifère. Ces distributions et la gamme de valeurs obtenue illustrent l'importante variabilité des valeurs associées au comportement hydrodynamique « karstique » de l'aquifère.

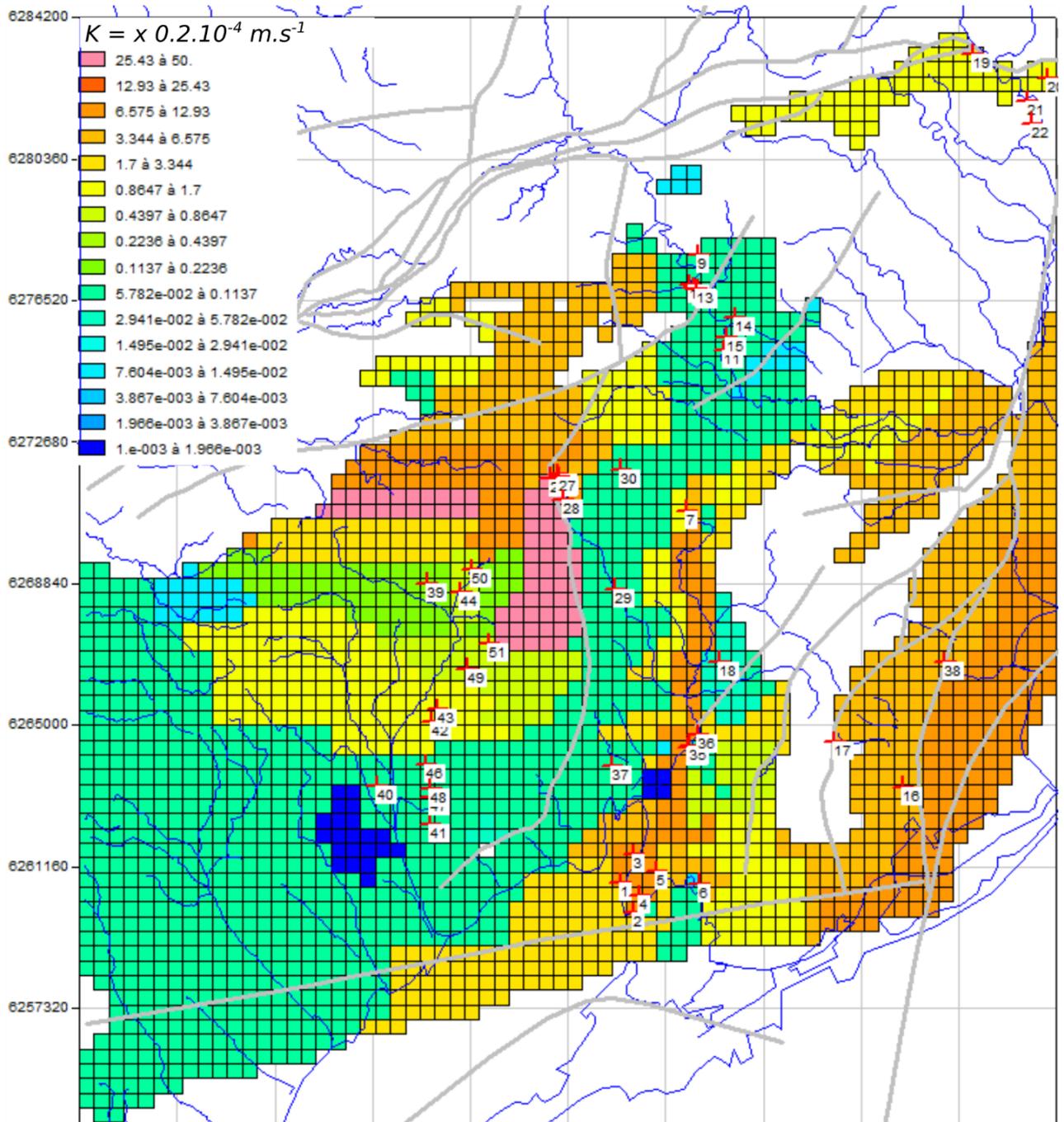


Figure 36 : Champ des perméabilités dans la couche 8 obtenu après calibrations en régime permanent et régime transitoire. Les croix rouges représentent les emplacements de principales sources temporaires et pérennes du territoire. Les lignes grises matérialisent les principales structures géologiques.

b) Piézométrie

La Figure 37 montre une comparaison des distributions des piézométries calculées dans la couche 8 en période de hautes et basses eaux. Ces cartes mettent en évidence des modifications notables de la piézométrie en fonction des distributions de conductivités hydrauliques et de la saisonnalité. Des différences de hauteurs piézométrique sont visibles sur le pourtour ouest de la montagne de la Moure : en période de hautes eaux, les cotes piézométriques augmentent sur les secteurs de la montagne de la Moure et sur le causse d'Aumelas. Le gradient piézométrique sur les versants ouest et est devient alors plus important comparé à la situation observée en basses eaux. Au centre du domaine de modélisation (axe Vène, Issanka, Vise), le gradient piézométrique s'accroît aussi en période de hautes eaux comparé au période de basses eaux. La dynamique calculée et les valeurs de piézométrie obtenues sont comparables à celles observées sur le terrain. Cette capacité du modèle à converger et à reproduire la cohérence et la saisonnalité de la piézométrie à l'échelle du territoire constitue un résultat notable de cette étape de modélisation.

Les Figure 38 et Figure 39 montrent des exemples de comparaisons de piézométrie observées au pas de temps journalier et calculées au pas de temps mensuel sur deux piézomètres situés dans le Jurassique Supérieur. Sur la période 1990 à 2021, la comparaison montre que les hausses et les diminutions de piézométrie calculées sont concomitantes avec celles observées. Ce résultat montre que les dynamiques temporelles locales de la piézométrie sont reproduites par le modèle.

Dans le processus de calibration, le choix a été fait de travailler autour des valeurs moyennes de piézométrie observées dans le but d'évaluer les possibilités de modélisation sur un scénario « moyen ». D'autres modalités de calibration peuvent être considérées, par exemple pour la simulation des étiages. Les résultats montrent que dans ce cadre, les calculs reproduisent des fluctuations piézométriques de 20-30 m dans la région de Villeveyrac, cohérentes avec les observations. La reproduction des amplitudes est néanmoins sous-estimée sur les autres ouvrages, comme par exemple celui de CGE – Tennis (10166X0212/BV83, Figure 39).

Les différences observées, notamment au niveau de la reproduction des pics de piézométrie sont vraisemblablement liées au choix du modèle d'écoulement du type milieu poreux équivalent. En effet, ce type d'approche induit un comportement plus inertiel que celui à la fois dynamique et inertiel rencontré dans le karst en général. Pour modifier l'amplitude des variations de piézométrie calculée, nous avons diminué les valeurs de coefficient d'emménagement (jusqu'à 10^{-5} [-] dans les parties captives et 10^{-20} dans les parties libres). Malgré ces modifications, les amplitudes observées n'ont pu être reproduites par le modèle.

c) Débits

La Figure 40 montre une comparaison entre les valeurs de débits de la source de la Vise observées au pas de temps journalier et calculées au pas de temps mensuel entre 2016 et 2021. La série de mesures à la source de la Vise débute fin mai 2019, suite à l'équipement permettant une mesure de débit de la source de la Vise (Lamotte, 2019). Les calculs du modèle s'arrêtent à la fin du dernier pas de temps de calcul (fin mai 2021). Cette comparaison montre des caractéristiques semblables à celles énumérées pour la piézométrie : la magnitude calculée pour les hausses de débit est sous-estimée comparée à celle observée. Néanmoins, la temporalité des variations de débits calculé et observé est respectée. Les calculs montrent qu'en période de tarissement, le débit calculé à la Vise est sous-estimé par le modèle. Par ailleurs, dans l'état actuel de développement, le modèle n'a pas permis de reproduire la modification du régime d'écoulement liée à l'inversion soudaine des flux qui est survenue à la Vise à partir du 29 novembre 2021. Néanmoins, grâce à la condition à la limite de charge imposée appliquée sur la maille de la source de la Vise, la représentation de ce type d'inversion dans le modèle reste possible.

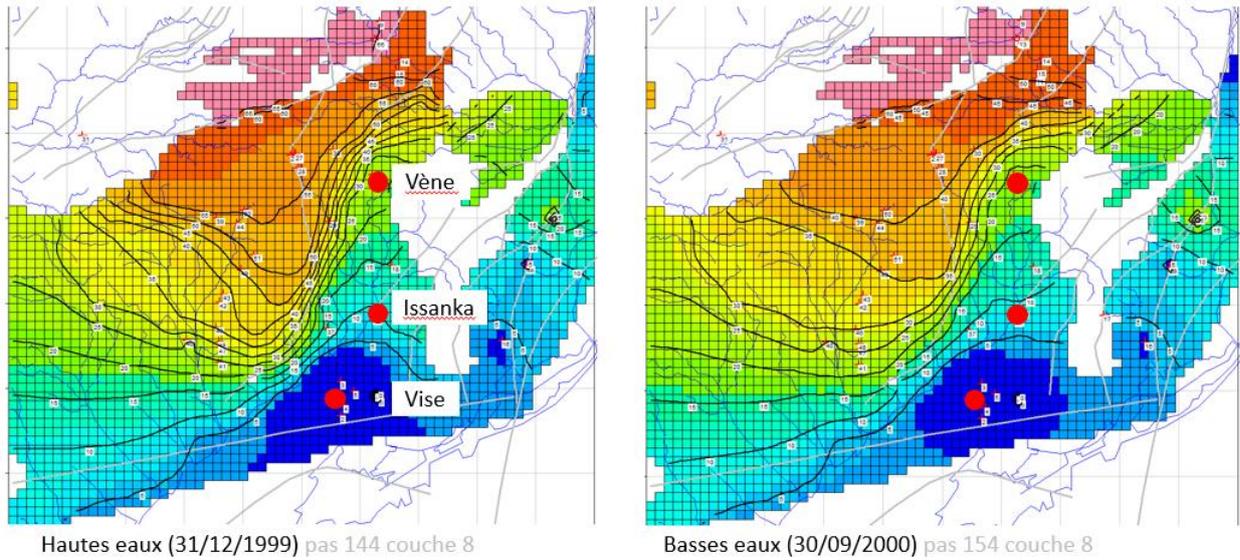


Figure 37 : États des charges calculées en régime transitoire en période de hautes (gauche) et basses eaux (droite) dans la couche 8 représentant la géométrie du Jurassique Supérieur dans le modèle MARTHE. Les calculs reproduisent (i) la géométrie régionale des écoulements dans l'aquifère et (ii) les modifications de géométrie d'écoulement au sein du chemin d'écoulement préférentiel entre le trop-plein de la Vène, Issanka et la Vise.

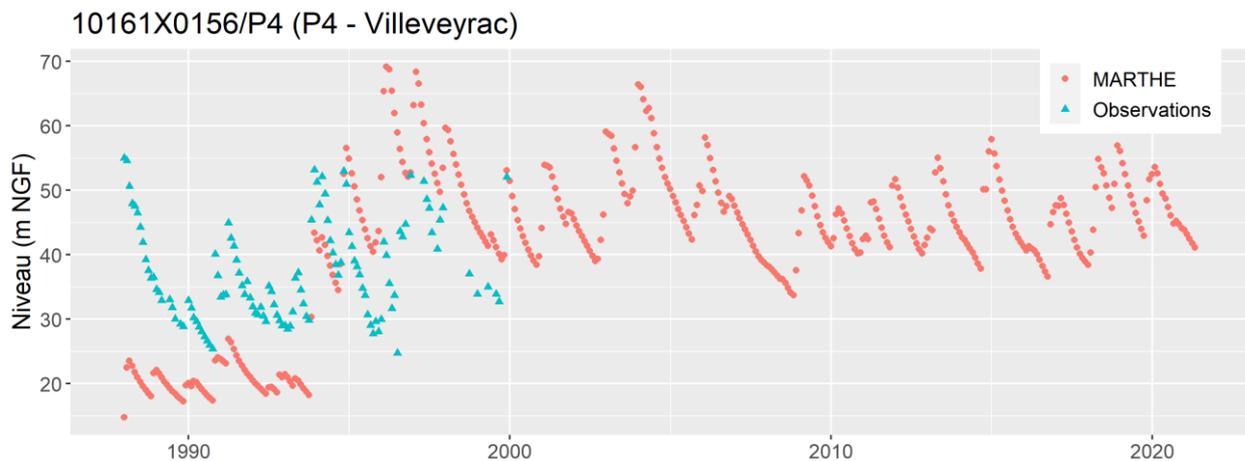


Figure 38 : Comparaison de la piézométrie observée et calculée au pas de temps mensuel sur la période 1988 - 2021 à Villeveyrac (10161X0156/P4). Les observations ont été échantillonnées à la date du calcul mensuel.

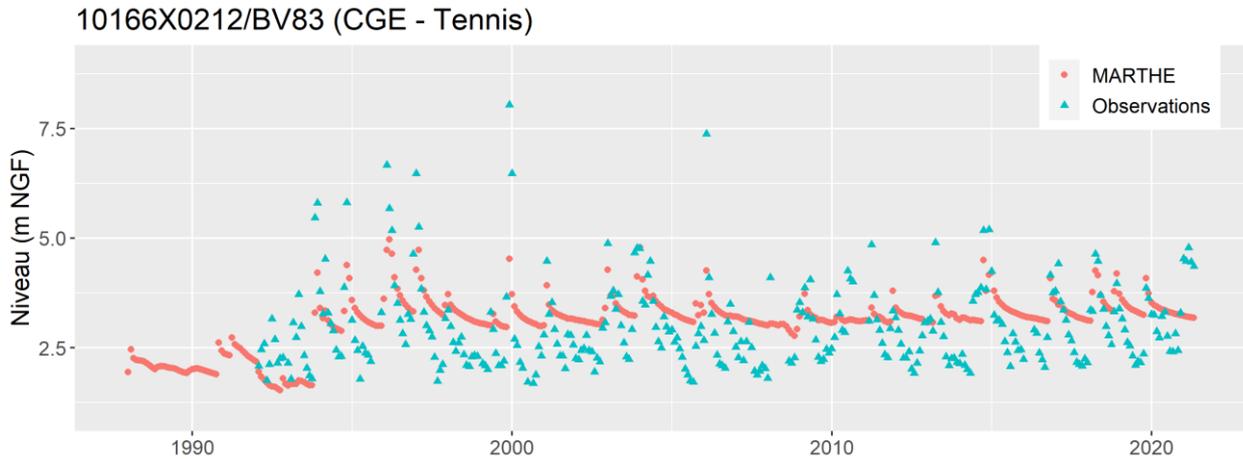


Figure 39 : Comparaison de la piézométrie observée et calculée au pas de temps mensuel sur la période 1988 - 2021 à Balaruc-le-Vieux (10166X0212/BV83 - CGE Tennis). Les observations ont été échantillonnées à la date du calcul mensuel.

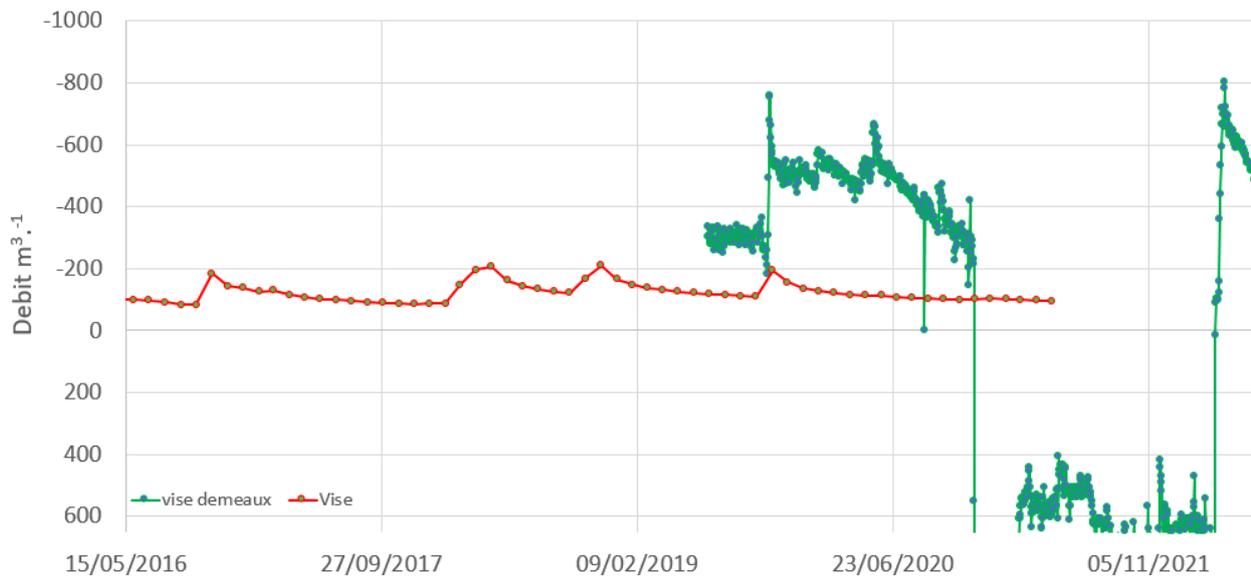


Figure 40 : Comparaison des débits de la Vise observés (vert) et simulés en régime transitoire au pas de temps mensuel (rouge) par le modèle MARTHE dans le cadre du projet Dem'Eaux Thau.

d) Transport et chemins d'écoulement

Afin de caractériser les principaux chemins d'écoulement vers la source de la Vise, le modèle MARTHE a été utilisé en effectuant un calcul inverse de trajectoires (depuis le point d'arrivée, vers l'amont). Le calcul des trajectoires est bidimensionnel dans chaque couche : il est réalisé avec 30 particules associées à la couche 8. Le point d'arrivée est un cercle de 700 m de rayon centré sur la maille de la Vise.

La Figure 41 montre les trajectoires inverses calculées pour 30 particules terminant à la Vise. La convergence des arrivées vers la source est marquée par deux groupes d'écoulement. De l'amont vers l'aval, les particules associées au premier chemin d'écoulement :

- prennent leur origine sur le Causse d'Aumelas et traversent le versant sud du causse ;
- se dispersent entre le flanc est de la montagne de la Moure et la partie au nord-ouest de Cournonsec ;

- convergent sous Montbazin ;
- suivent une ligne commune entre Montbazin et Balaruc le Vieux (en passant par Issanka) ;
- convergent vers la source de la Vise en passant par la presqu'île de Balaruc.

À noter que dans la partie amont, les écoulements sur la partie est de la montagne de la Moure suivent une ligne relativement cohérente avec les sources d'Antonègre – Cure Grenier et Oulettes (Montbazin). Sur la partie nord-ouest de Cournonsec, les écoulements passent par le trop-plein de la Vène (Cournonsec). Plus à l'aval au niveau de la source d'Issanka : une fraction des écoulements diverge et passe à l'est au niveau de la Mathe. Cependant, les écoulements en provenance de la Gardiole et qui convergent à la Vise sont très limités. Enfin, ces calculs montrent que ce groupe d'écoulement contribue à 1/3 des chemins d'écoulement. Les 2/3 restant sont associés au second groupe.

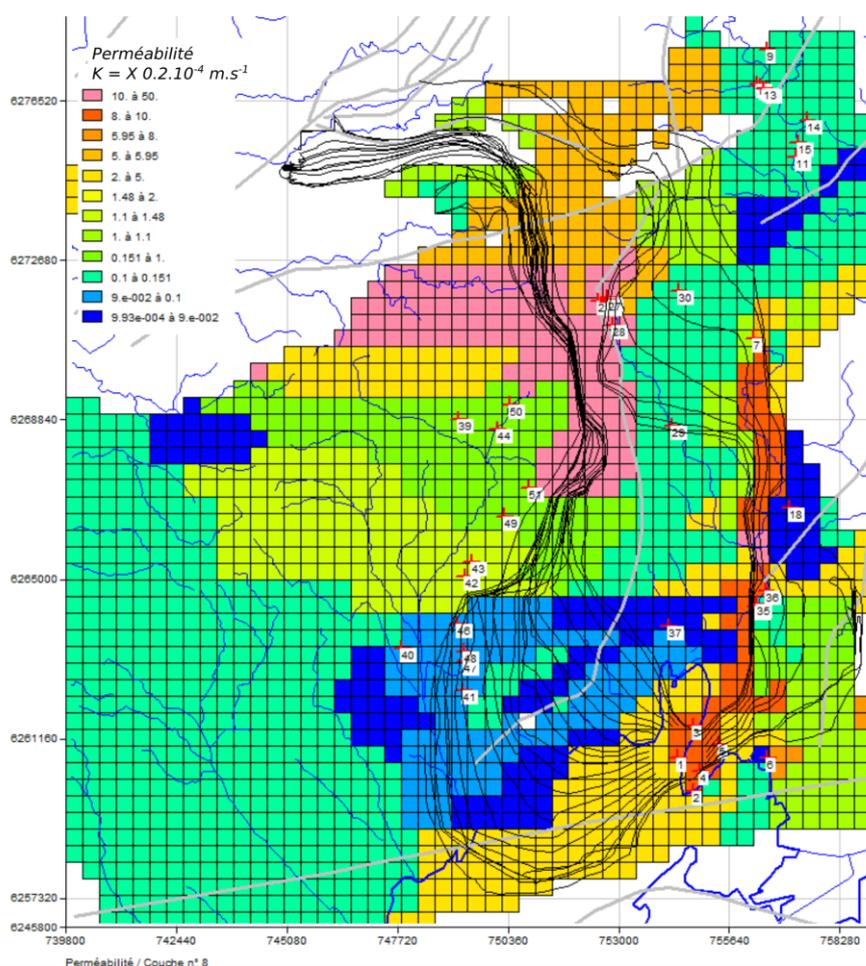


Figure 41 : Exemples de trajectoires (noir) vers la source de la Vise dans la couche 8 (J. Sup.) du modèle MARTHE, le fond correspond aux perméabilités de la couche. Les calculs montrent deux groupes (à l'est sur et à l'ouest de la montagne de la Moure) qui contribuent à l'alimentation de la source.

Le second groupe de chemin d'écoulement est associé à une zone d'alimentation située au nord de la montagne de la Moure, au sud du grand Puech (causeuse d'Aumelas). Les écoulements suivent une ligne commune d'axe nord-sud selon le tracé de la Montagne de la Moure puis divergent à l'est de Veyrac. Les lignes d'écoulement divergent depuis l'ouest de Loupian jusqu'au nord de Bouzigues (La Moulière) puis convergent vers la source de la Vise à l'ouest de

la presqu'île. À noter que les écoulements qui tendent à diverger à l'ouest ont une trajectoire qui s'étend au sud, sous l'étang de Thau (profondeur de l'interface Miocène Jurassique : -249 m, profondeur de l'interface J. Sup – J. Moy. estimée à env. -1 300 m). Les circulations selon ce chemin d'écoulement apparaissent comme une fraction d'un ensemble d'écoulements qui alimente la partie profonde sous couverture du bassin de Villeveyrac. Plus à l'ouest, ces écoulements sont associés à des temps de résidence importants (**Ranchoux et al.**, 2022).

4.6. IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE À L'HORIZON 2100

Les calculs réalisés en régime transitoire montrent que la temporalité (dynamique) des variations de la piézométrie et de débit est respectée sur des points stratégiques d'observation de l'aquifère. Le respect de cette temporalité dans les compartiments (Aumelas – Villeveyrac et Axe Vene Issanka Vise) permet de simuler les évolutions et tendance selon un scénario prospectif en lien avec les changements climatiques à l'horizon 2100. Cette prospection porte sur une variable d'entrée : la recharge ; et sur une variable hydrogéologique : le débit de la source de la Vise.

4.6.1. Méthode

Le modèle calibré en régime transitoire est utilisé afin de caractériser les modifications d'écoulement relatives à une modification de la recharge. Pour cela, les régimes d'entrée (recharge) et de sortie (piézométrie, débit) sont comparés sur des périodes de temps prospectives vis-à-vis d'une période de référence. Cependant, les variations des prélèvements et de la recharge peuvent contribuer conjointement à modifier les réponses hydrologiques à la fois sur la période de référence et sur les plages de prospection. Afin de s'affranchir de l'influence des modifications des prélèvements, ces derniers sont négligés. De ce fait, les résultats obtenus sont uniquement liés aux modifications de recharge.

La méthodologie employée dans ce travail se base sur l'exercice CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project, 5^e phase) sur lequel s'est appuyé le dernier rapport du GIEC (2021). Le choix a été fait d'utiliser dans cette étude un couple de modèles globaux / régionaux (GCM/RCM) avec HadgME-ES/CCLm4. Ce modèle représente un cas extrême qui donne, dans le cadre d'un scénario d'émission RCP 8.5 (le plus pessimiste), des résultats de forte diminution des pluies et de forte augmentation de la température à l'horizon 2071-2100.

Les simulations climatiques ont une période historique (jusque 2005) et des périodes de projections « forcées » par les différentes trajectoires d'émission de gaz à effet de serre (RCP). Du fait de ces périodes de simulations, les analyses relatives au changement climatique sont découpées selon des périodes de 30 ans :

Climat actuel (référence) : 1981-2005 (référence CMIP5 1976-2005), Futur horizon proche : 2020-2050, futur horizon intermédiaire : 2040-2070 et futur horizon lointain 2070-2100. Les résultats sont présentés relativement à la période de référence.

La pluie efficace utilisée dans le cadre de ces simulations est issue du jeu de projection climatique intitulé HadgME-ES/CCLm4. Ce jeu de projection figure parmi l'un des plus pessimistes en terme de projection des températures et de la pluviométrie (Figure 42) dans le cadre d'un scénario d'émission de gaz à effet de serre considéré comme pessimiste (« pas de modification » - RCP85). Les pluies efficaces et la température ont été extraites du jeu DRIAS 2020 à partir du portail partenarial DRIAS (Météo-France, IPSL, Cerfacs), elles ont été retravaillées au BRGM dans le cadre du projet Explore 2.

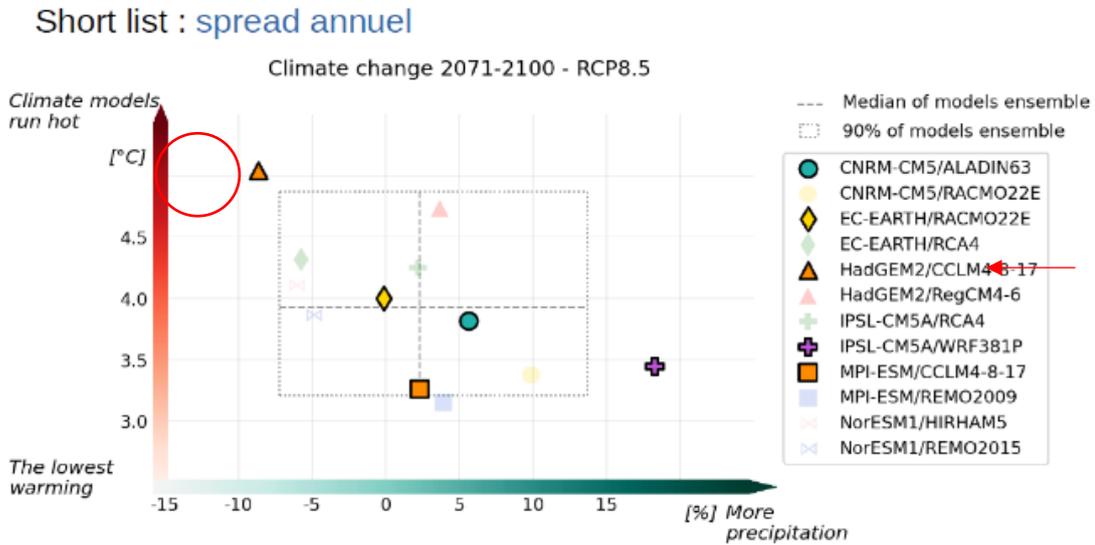


Figure 42 : Aperçu des anomalies annuelles des pluies (abscisses) et températures (ordonnées) annuelles simulées par les différents modèles climatiques à l'horizon 2071-2100 selon la trajectoire d'émission RCP85. Dans ce travail nous avons retenu HadgME-ES/CCLM4 (triangle haut gauche) qui est le plus pessimiste (plus de chaleur, moins de précipitations) - partenarial DRIAS (Météo-France, IPSL, Cerfacs) et donnée retravaillée au BRGM dans le cadre du projet Explore 2 (coordination INRAE).

4.6.2. Résultats

L'analyse des résultats porte sur un jeu de simulation avec un modèle de changement climatique associé à une trajectoire d'émission de gaz à effet de serre. La simulation hydrogéologique est analysée dans un premier temps au regard des flux de recharge appliqués au domaine et dans un second temps au regard de l'évolution de la distribution des débits à la source de la Vise. Les résultats sont analysés par rapport à une référence : la période de temps 1981-2005.

a) Recharge

Les résultats sont présentés pour quatre périodes de temps : 1981-2005, 2020-2050, 2040-2070 et 2070-2100. Par la suite, les horizons 2050, 2070 et 2100 sont nommés horizons « proche » « intermédiaire » et « lointain » respectivement.

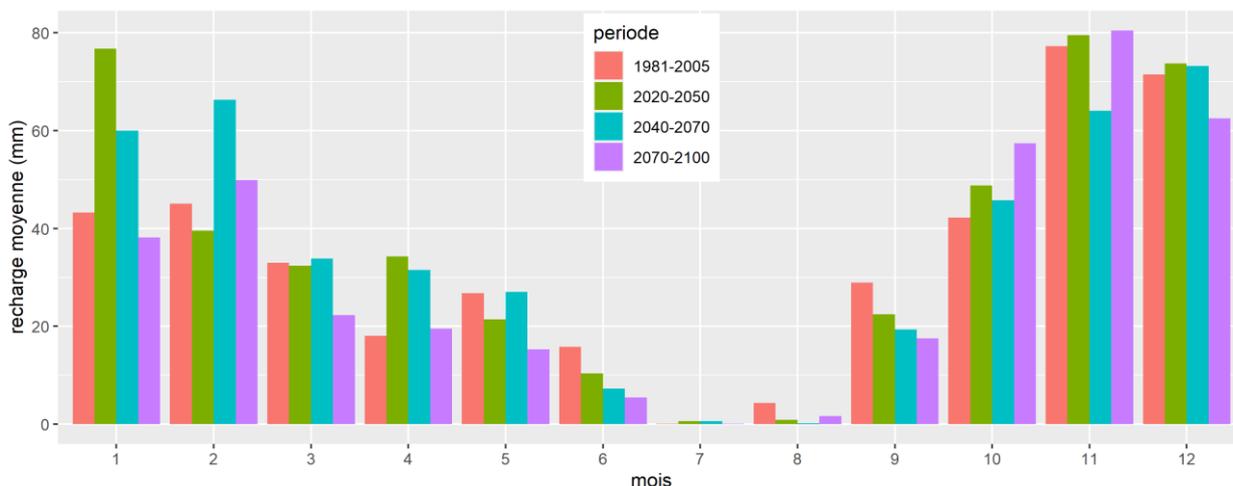


Figure 43 : Comparaison des cumuls moyens mensuels de recharge issus du traitement des pluies et température des projections HadgME-ES/CCLm4 – RCP85 et appliquées au modèle MARTHE de l'entité A.V.I.C.. La comparaison montre la complexité de l'évolution temporelle de la recharge dans la région.

Les évolutions temporelles des cumuls moyens mensuels de recharge sont présentées sur la Figure 43. On observe qu'aux horizons intermédiaire et lointain les cumuls de recharge sont :

- supérieurs aux périodes de références passées au mois de février ;
- globalement plus faibles sur la période estivale (entre mai et septembre).

Ces résultats suggèrent des modifications de cumuls de recharge moyen saisonniers. La Figure 44 montre les distributions des recharges moyennes classées par saison de basses et de hautes eaux aux différents horizons temporels. Sur la période de référence (1981-2005), les cumuls moyens de recharge en basses et hautes eaux sont respectivement 19,5 mm et 54 mm. À l'horizon 2100, les cumuls de recharge seront en moyenne de 16,7 mm (-14 %) et 50,7 mm (-6 %) pour les basses et hautes eaux respectivement. La variabilité des épisodes de recharge en période de basses eaux semble diminuer dans le futur (écart interquartiles réduit). Cette diminution de la variabilité n'apparaît pas pour la période de hautes eaux pour laquelle on observe un décalage global des statistiques vers des valeurs plus faibles. Ces résultats indiquent que les effets sur la recharge, associée au choix de modèle de climat et de trajectoire d'émission, seront relativement plus marqués pour la période estivale.

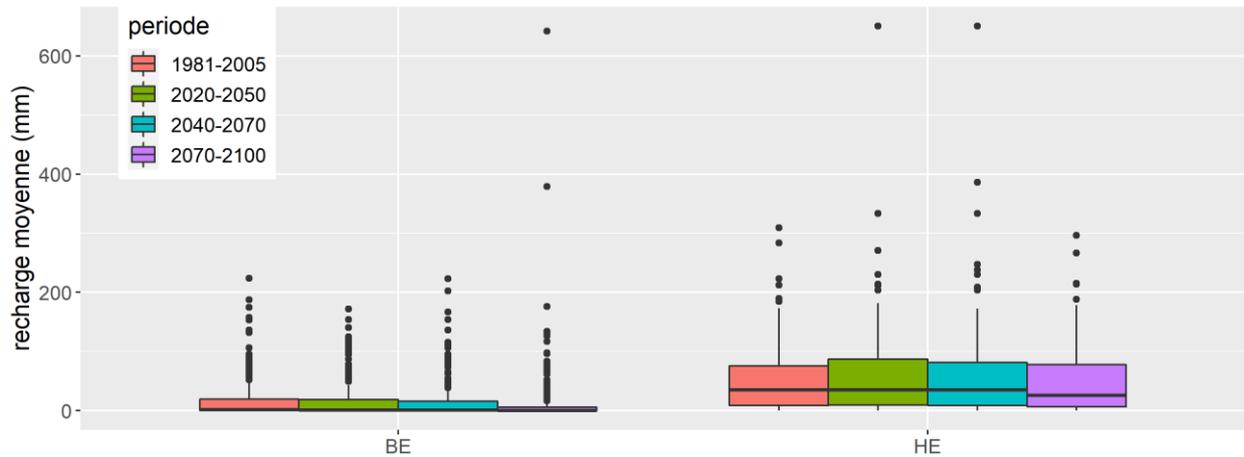


Figure 44 : Distribution des recharges moyennes en fonction des horizons temporels (période de référence 1981-2005) et de la saisonnalité hydrologique (BE : Basses Eaux – d’avril à octobre ; HE : Hautes Eaux - de novembre à mars).

b) Débits de la Vise

Les conséquences d’une modification du climat via la composante de recharge sont analysées sous l’angle de l’évolution de la distribution des débits de la source de la Vise. Les variables retenues à la source sont l’évolution de la distribution mensuelle des débits et l’évolution des minimas annuels des débits simulés au pas de temps mensuel, ces derniers renseignant sur l’évolution des états de sécheresse.

- **Débits mensuels**

La Figure 45 montre l’évolution des distributions des débits sur les quatre périodes de temps (1981-2005, 2005-2050, 2040-2070 et 2070-2100). Pour rappel, ces distributions sont obtenues à partir de la valeur de débit journalier obtenue au pas de temps mensuel. La représentation en boîte à moustache permet de mettre en évidence une évolution des distributions des débits selon la médiane (noir gras sur la figure), les 1^{er} et 3^e quartiles (extrêmes bas et haut de la boîte – 25^e et 75^e centiles), les 5^e et 95^e centiles (en bout de bras bas et haut de la boîte) et les extrêmes situés au-delà des limites de bras.

Dans l’ensemble, les résultats montrent des différences qui se distinguent à l’horizon lointain. Les différences entre la période de référence 1981-2005 et l’horizon proche (2020-2050) ou intermédiaire (2040-2070) sont peu significatives. Néanmoins, les résultats significatifs à l’horizon lointain (2070-2100) montrent qu’en comparaison à la période de référence l’ensemble des débits sont globalement plus faibles, comme le montre la valeur médiane (rouge). À l’horizon 2100, les moyennes des débits calculés au pas de temps mensuels diminuent de -3 % (médiane : -4 %). Les événements extrêmes (maximum) resteraient dans la gamme des débits déjà connus. Néanmoins, ces résultats sont à prendre avec précaution étant donné les efforts restant à mener pour calibrer et simuler les débits de pointe (cf. § 4.5). Les débits minimaux seront eux aussi plus faibles, les statistiques plus détaillées relatives à ces débits sont étudiées par la suite.

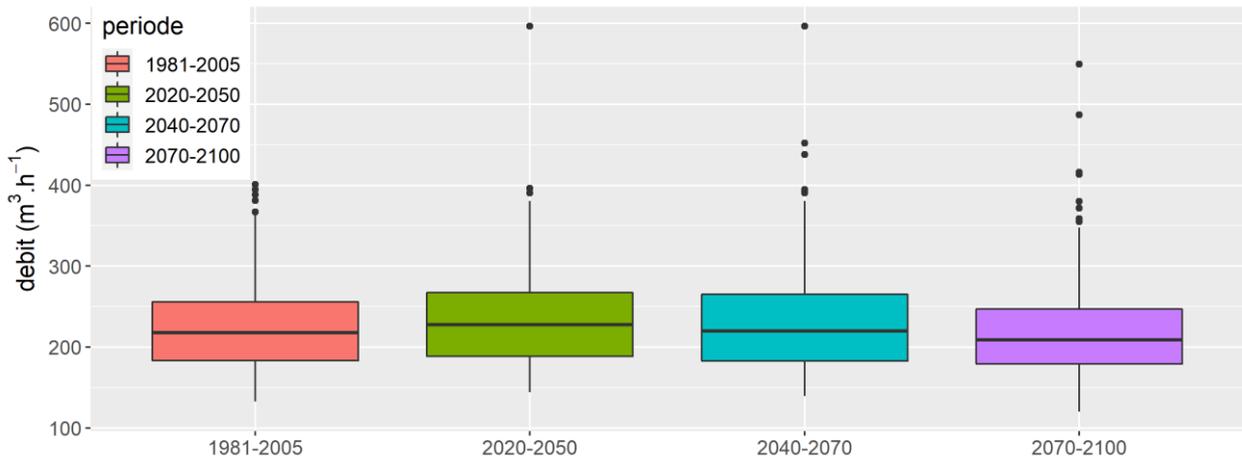


Figure 45 : Résultats de calcul du modèle MARTHE de l'entité A.V.I.C : Évolution des distributions des débits de la Vise calculés à la date de fin de mois sous contrainte de recharge issue des projections HadgME-ES/CCLm4 – RCP85. Les calculs ne prennent en compte aucun prélèvements.

De la même manière que pour la recharge, les statistiques des débits sont illustrées par périodes de basses et de hautes eaux (BE et HE respectivement) sur la Figure 46. Les résultats montrent des diminutions significatives des statistiques pour chaque période (BE et HE) à l'horizon lointain (2070-2100). Par exemple les moyennes des débits calculés au pas de temps mensuels diminuent de -4 et -5 % (médianes : -6 et -4 %) pour les basses et hautes eaux respectivement. Ces résultats confirment les statistiques globales vues précédemment pour les débits. Par ailleurs, ils tendent à mettre en évidence que la diminution des cumuls moyens de recharge en période estivale (-14 % en moyenne à l'horizon 2100) n'impacte pas linéairement la moyenne des débits de la Vise. La suite de ce travail porte sur l'évolution des débits minimaux comme proxy des états de sécheresse.

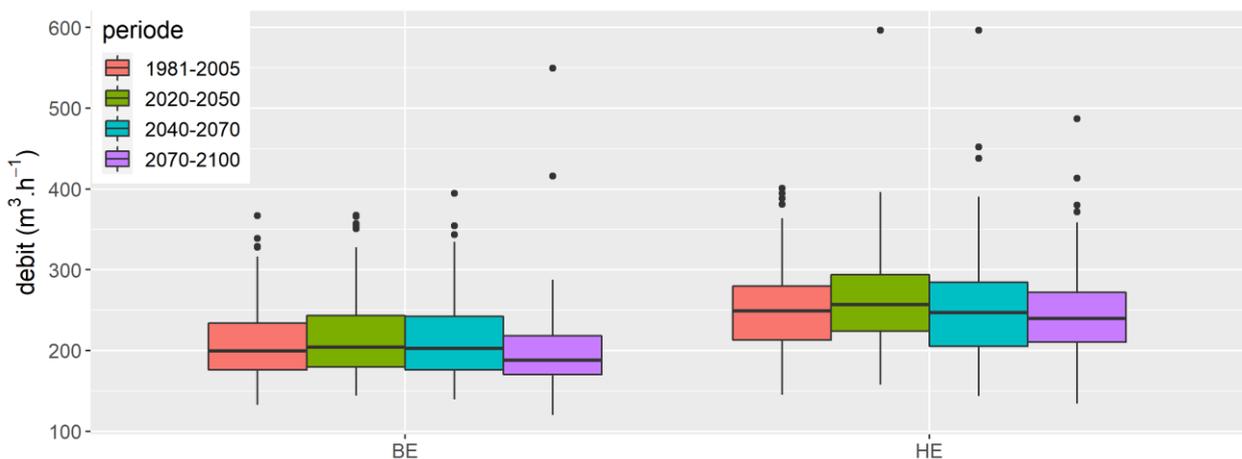


Figure 46 : Distribution des débits de la Vise calculés au pas de temps mensuel (date en fin de mois) en fonction des horizons temporels (période de référence 1981-2005) et de la saisonnalité hydrologique (BE : Basses Eaux – d'avril à octobre ; HE : Hautes Eaux - de novembre à mars).

- **Débits minimaux annuels**

La Figure 47 montre l'évolution des distributions des débits minimaux annuels sur la période de référence et les trois futures périodes de temps.

Au regard des médianes, celle associée aux débits minimaux à l'horizon proche apparaît comme supérieur à la période de référence. En revanche, celles associées aux horizons intermédiaire et lointain sont relativement semblables à la période de référence. Par ailleurs, au regard de la variabilité, les résultats montrent qu'à l'exception de l'écart interquartile à l'horizon 2070-2100 relativement réduit (15), les écarts restent dans des gammes de valeurs semblables (24-27) aux horizons proches et intermédiaires. Enfin, si des valeurs « extrêmes hautes » semblent associées aux débits minimaux aux horizons proches et intermédiaires, on peut observer que seul l'horizon lointain présente une valeur « extrême basse ».

Ces tendances et évolutions des débits minimaux nécessitent d'être remis en contexte, vis-à-vis de la démarche de calibration du modèle hydrogéologique et de la recharge utilisée. Le modèle calibré en transitoire permet de reproduire la dynamique des recharges, mais des précisions pourraient être apportées pour reproduire les extrêmes bas des variables hydrogéologiques (piézométrie et débit) rencontrés à l'étiage (cf. la piézométrie à CGE-Tennis - Figure 39 et les débits de la Vise - Figure 40). Ceci implique que les statistiques obtenues au regard des débits minimaux restent indicatives et ne peuvent être interprétées quantitativement. Si la transposition des résultats obtenus reste hypothétique pour les processus d'étiages, elle pourrait être confirmée avec un modèle calibré et validé sur ces mêmes processus.

Par ailleurs, la recharge utilisée est issue d'un unique couple modèle – trajectoire d'émissions – relativement pessimiste, qui figure parmi les extrêmes (plus chaud et moins de précipitations). Ce choix unique limite les possibilités d'estimation d'incertitudes liées aux entrées (recharge uniquement) du modèle. À l'échelle de l'entité hydrogéologique, ce choix de recharge semble induire des valeurs de variables hydrogéologiques, notamment de débits minimaux, qui tendent vers des baisses de variabilité et des valeurs minimales, en période d'étiage à l'horizon lointain. Hors période d'étiage, les résultats sont relativement similaires vis-à-vis par exemple des extrêmes ou de la variabilité des résultats.

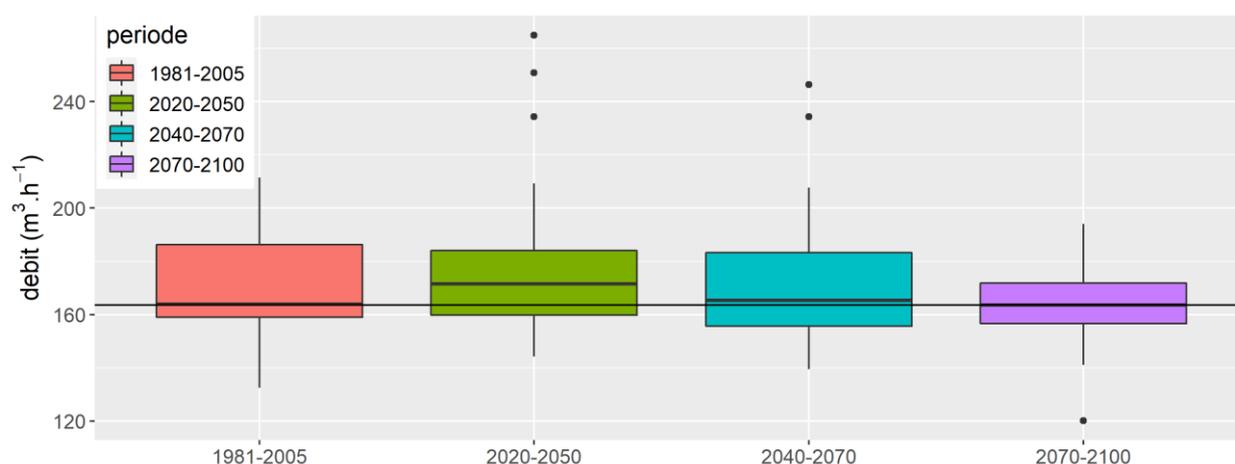


Figure 47 : Résultats de calcul du modèle MARTHE pour les évolutions des distributions des débits minimaux annuels de la Vise sous contraintes de recharges issues des projections HadgME-ES/CCLm4 – RCP85. Les calculs du modèle sont réalisés sans prélèvements.

4.7. SYNTHÈSE ET PERSPECTIVES

4.7.1. Synthèse

Un important travail a été mené afin de transférer le modèle géologique tridimensionnel développé dans le cadre du projet (modèle géologique sous GeoModeller) vers l'outil de modélisation hydrogéologique MARTHE. L'aboutissement de ce travail est une géométrie de domaine de modélisation hydrodynamique très détaillée en plan (grille de 400 x 400 m) et en profondeur (multicouche avec compartimentation du domaine vis-à-vis des accidents majeurs). La discrétisation du domaine en multicouche permet de réaliser des calculs au sein de zones d'écoulements avec des propriétés physiques discrétisées en 3D associées à des étages géologiques différents (p. ex. Jurassique Supérieur et Moyen). Les calculs d'hydrodynamique qui ont été réalisés avec cette géométrie de domaine ont porté sur le calcul des flux et des charges dans l'hydrosystème en régime permanent et transitoire.

L'approche de modélisation mise en œuvre pour simuler les écoulements au sein de l'entité hydrogéologique s'est basée sur une approche numérique de type milieu poreux équivalent. Cette représentation s'est révélée performante pour la reproduction des simulations de charge en régime permanent, dans le sens où elle permet d'aboutir à une distribution des charges à l'échelle régionale comparable aux états de référence observés. Elle permet aussi de reproduire localement des débordements correspondant aux sources, et les flux ascendants correspondant à des différences de charges verticales observées entre des horizons peu profonds (0-100 m) et profonds (700 m) (e.g. différences de charges entre DemT1 et DemT4).

Cette approche type milieu poreux équivalent permet de réaliser des premiers calculs en régime transitoire en tenant compte des évolutions spatiotemporelles des prélèvements du territoire. Ces calculs ont permis de mettre en évidence la robustesse du modèle développé dans le sens où les dynamiques de réponse vis-à-vis de la recharge sont relativement bien reproduites au pas de temps de calcul (mensuel). Les calculs en régime transitoire ont aussi permis de mettre en évidence une limite de l'approche employée : la reproduction des événements peu inertiels (décroissance rapide de la piézométrie et des débits) rencontrés dans le karst requiert d'intégrer des processus d'écoulements complémentaires. Une perspective serait d'utiliser une représentation hybride bimodale des écoulements entre conduits karstiques et matrice poreuse (approche disponible dans MARTHE). Néanmoins, ce type d'approche étend le nombre de paramètres qui sont difficilement caractérisables expérimentalement (p. ex. localisation des conduits, diamètres, coefficient de rugosité). Bien que perfectibles, les résultats obtenus en régime transitoire montrent que le modèle peut permettre d'appréhender le comportement de l'aquifère sous la contrainte d'une modification de la recharge.

Une analyse du comportement de l'aquifère sous contrainte d'une modification de la recharge a été menée pour appréhender le comportement de l'aquifère eu égard au changement climatique, sans prise en compte des prélèvements. Le modèle climatique et la trajectoire d'émission employés figurent parmi les plus pessimistes en terme de pluviométrie et de températures. L'analyse des calculs prospectifs a été menée sur les débits de la source de la Vise, cette dernière représente l'exutoire aval connu de l'aquifère (intégrant la réponse globale de l'hydrosystème). Les résultats à l'horizon proche (2040-2070) restent dans les gammes de variabilités calculées sur les périodes de références. En revanche les résultats obtenus à l'horizon lointain ont montré une diminution significative des débits annuels et une diminution de la variabilité et de l'intensité des débits minimaux annuels. Ces modifications à long terme apparaissent en lien avec l'allongement temporel des sécheresses estivales (plus précoces) qui impactent la dynamique des débits de tarissement (en baisse, sur des périodes de temps plus longues).

4.7.2. Mise en perspectives des résultats

Le travail de modélisation réalisé permet d'apporter trois éléments d'informations qui précisent ou confirment le modèle conceptuel des écoulements dans l'hydrosystème des calcaires du Jurassique. Un premier élément d'information est apporté par la structure du domaine hydrogéologique et la limite avec la faille de Thau au sud qui, en la considérant imperméable, permet une compartimentation des écoulements entre deux parties « au nord » (Issanka, Vise) et « au sud » (côté Sète). Cette structure permet de réaliser des écoulements convergents vers la Vise, comme détaillé plus bas.

Un second élément d'information est apporté avec la distribution spatiale des valeurs de perméabilités obtenues par calibration. La phase de construction / optimisation du champ des perméabilités a mis en évidence la nécessité de contrastes de perméabilités pour respecter les piézométries régionales. Par exemples :

- le contraste de perméabilité au sein d'un axe d'écoulements préférentiels sur l'axe trop-plein de la Vène, Issanka, source de la Vise ;
- le contraste entre la montagne de la Moure et l'axe d'écoulements préférentiels mentionnés ci-dessus.

Un troisième élément d'information qui découle de cette distribution spatiale des perméabilités est la contrainte sur les chemins d'écoulement. Les calculs montrent qu'à partir d'une origine commune (Causse d'Aumelas) deux groupes d'écoulements convergent vers la Vise. L'un traverse la partie méridionale du territoire (depuis la partie sud du causse d'Aumelas en passant par i) le flanc est de la montagne de la Moure ou ii) le trop-plein de la Vène puis par Issanka et la Vise. L'autre traverse la montagne de la Moure et converge vers la Vise après un passage en profondeur sous le bassin de Villeveyrac et sous l'étang de Thau. En outre, les différences de charges calculées entre les couches aquifères (couche 8 et 9, J. Sup. et Moy respectivement) montrent des transferts verticaux ascendants dans la zone de Balaruc, confirmant un chemin d'écoulement associé à un flux profond.

4.7.3. Perspectives de modélisation

Des perspectives de modélisation distribuées émergent à différents niveaux : numérique, de la conceptualisation des écoulements, des processus pris en compte dans la modélisation et des objectifs de modélisation.

En lien avec l'objectif de mieux simuler et prédire les modalités d'écoulement à l'étiage, favorables aux inversacs, la calibration du modèle pourrait être revue spécifiquement sur ces périodes. Une telle calibration du modèle pourrait être couplée à la prise en compte de la dynamique de la lagune au niveau de la Vise. Ceci pourrait être fait en traduisant la dynamique temporelle des hauteurs de la lagune en équivalent eau douce et en modifiant temporellement la charge imposée sur la maille associée à la source. Ce couplage devrait permettre une meilleure représentation des basses eaux et des déclenchements/rétablissement d'inversac.

Vis-à-vis des processus pris en compte dans la modélisation, les perspectives portent principalement sur la prise en compte des effets densitaires, en lien avec la salinité et la température des fluides dans l'hydrosystème. La modélisation de ces effets s'inscrit dans un objectif de modélisation plus avancé de la compréhension des écoulements et de l'anticipation des processus d'inversac à l'aide d'un modèle numérique local. Le contour de ce modèle local s'étendrait jusqu'au sud au niveau de l'interface lagune-mer afin de prendre en compte la faille de Thau qui semble favoriser les flux chauds, rapides (~10 jours). Cette nouvelle modélisation

pourra être réalisée à partir de l'outil MARTHE développé ici, par exemple en utilisant un maillage plus détaillé (gigognes, plusieurs couches et plus haute résolution spatiale) que celui adapté à la problématique régionale. Les effets densitaires requièrent par ailleurs la définition de propriétés physiques nouvelles (en particulier avec la thermique) qui pourront être conditionnées par les mesures et expériences réalisées sur les nouveaux forages DEMA1-T4 situés à proximité de la Vise.

Enfin l'outil de modélisation actuel pourrait être utilisé pour des calculs prévisionnels ou selon des scénarios de gestion, avec la prise en compte d'incertitudes. Ce travail porterait sur les calculs d'évolutions des piézométries et débits dans un contexte de changements globaux qui impactent la recharge, à partir de différents modèles et scénarios d'émission fournissant ainsi une base de calcul d'incertitude globale. Les évolutions d'apports de recharge ponctuels pourraient être pris en compte, par exemple pour le Coulazou. Le travail pourrait aussi porter sur la mise en évidence des effets des modifications des régimes de prélèvements (les plus importants en terme de débits, mais aussi ceux individuels et privés localisés sur la presqu'île de Balaruc) sur la piézométrie et les débits, dans un premier temps indépendamment et dans un second temps couplé aux modifications de recharge.

5. Conclusion

Ce rapport a pour objet deux approches de modélisation des écoulements dans l'aquifère karstique des calcaires du Jurassique associés à la source de la Vise de l'étang de Thau. Les résultats obtenus avec ces approches permettent d'apporter de nouveaux éléments quantitatifs et qualitatifs et de préciser des éléments du schéma conceptuel de l'aquifère.

Pour rappel, la zone d'étude comprend différents compartiments hydrogéologiques qui alimentent les principales sources et forages du territoire. Les écoulements convergent vers la presqu'île de Balaruc et la source de la Vise, l'exutoire connu comme étant le plus à l'aval dans l'aquifère. Dans la zone de convergence, trois types d'eau sont identifiés : (1) des eaux karstiques, (2) des eaux thermales et (3) des eaux marines du même type que l'eau de mer (ou de la lagune) actuelle.

L'outil de modélisation conceptuel à réservoir GARDENIA, a été utilisé afin de quantifier les flux d'eaux qui circulent dans et entre les différents compartiments hydrogéologiques, amont et aval, de l'hydrosystème.

À l'amont, le modèle développé se base sur les débits naturalisés de la Vène à l'aval d'Issanka. Ces écoulements ont été associés à une surface d'impluvium de 135,6 km² et les calculs évaluent une recharge de 153 mm/a en moyenne. Le modèle à réservoir simule trois flux sortants via : un seuil de trop-plein pour représenter le fonctionnement de la Vène à Cournonsec et de la source des Oulettes à Montbazin), une source pour celle d'Issanka et un débit de fuite pour représenter le flux vers le compartiment aval. Les résultats de modélisation montrent que les apports vers la zone aval sont saisonniers : faible en basses eaux (<30 l/s) et importante en hautes eaux (150 l/s). À l'aval, le couplage de la modélisation et des mesures de débits à la source de la Vise acquises pendant ce projet ont permis d'estimer (1) une recharge moyenne du compartiment aval (131-141 mm/an) selon le modèle considéré, (2) une surface d'impluvium (20,6 km²) et (3) un flux moyen de la Vise (0,127 m³/s, soit 4 millions de m³/a), ce dernier ayant une variabilité interannuelle faible (Min= 0,1 m³/s, Max =0,15 m³/s).

Ces éléments de bilan ont permis d'apporter des éléments quantitatifs sur les échanges entre les compartiments de l'aquifère et de mettre en perspective dans quelles conditions hydrologiques se sont produits les inverses passés (principalement en période de basses eaux). Ces éléments ont été complétés par une approche de modélisation distribuée physique à l'aide de l'outil MARTHE, qui permet d'obtenir des calculs de variables hydrogéologiques locales.

La conversion du modèle géologique révisé vers une géométrie des couches aquifères fonctionnelle dans l'outil de modélisation MARTHE constitue un élément de base, néanmoins important de ce travail. Cette conversion permet d'assurer la prise en compte de nouvelles informations géologiques, en particulier les profondeurs de couches et la faille de Thau, dans les simulations d'écoulements. Cette conversion a été complétée par des calculs d'écoulements en régimes permanent et transitoire à fins de calibration, permettant ainsi d'obtenir des distributions de valeurs de conductivités hydrauliques et de coefficient d'emmagasinement au sein de couches du modèle. Les valeurs de conductivités hydrauliques calibrées ont mis en évidence la nécessité de forts contrastes de valeurs pour reproduire les piézométries de références. Ces forts contrastes sont notamment situés entre la partie est de la montagne de la Moure et le centre du modèle pour reproduire l'axe de drainage orienté entre le trop-plein de la Vène, Issanka et la source de la Vise. Les nouvelles informations apportées par les calculs d'écoulements avec le modèle hydrodynamique MARTHE permettent de préciser les chemins d'écoulement et le schéma conceptuel de fonctionnement établi antérieurement (**Aquilina et al.**, 2002).

Vers la source de la Vise, les calculs de trajectoires ont montré de faibles contributions depuis la montagne de la Gardiole et deux familles d'écoulements avec pour origine le Causse d'Aumelas. La première famille d'écoulement passe par la montagne de la Moure et la seconde famille par la partie sud du Causse et l'axe « trop-plein de la Vène, Issanka, Vise ». Les résultats de calculs d'écoulement ont montré des gradients de pression positifs entre la couche profonde et la couche superficielle dans la région de Balaruc, confirmant la présence d'un flux ascendant qui pourrait contribuer au flux thermal présent dans cette zone. Ces résultats sont en accord avec les mesures réalisées sur les forages DEMA1 et DEMA4, proches de la source de la Vise. Ils viennent renforcer le schéma conceptuel des écoulements dans l'aquifère.

Des perspectives d'amélioration de ce modèle sont proposées, notamment en prenant en compte le transport de sel et les effets densitaires associés.

6. Bibliographie

- Aquilina, L., Ladouche, B., Doerfliger, N., Seidel, J. L., Bakalowicz, M., Dupuy, C., & Le Strat, P.** - (2002). Origin, evolution and residence time of saline thermal fluids (Balaruc springs, southern France): implications for fluid transfer across the continental shelf. *Chemical Geology*, 192(1), 1–21. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00160-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00160-2).
- Auriol, J., Carlier, P., & Marchal, J. P.** (1988) - *Modélisation de l'aquifère karstique de l'étang de Thau (Hérault)*. BRGM-88-SGN-459-LRO. <http://infoterre.brgm.fr/rechercher/search.htm>.
- Dörfliger, N., La Douche, B., Pinault, J. L., & Chemin, P.** (2001) - Etude du pourtour Est de l'étang de Thau, phase II. In *Rapport BRGM/RP-50789-FR: Vol. volume 4*. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-50787-FR.pdf>.
- Hemelsdael, R., Séranne, M., Caritg, S., Courrioux, G., Husson, E., Jacob, T., & Lamotte, C.** - (2021). *DEM'Eaux Thau - Construction d'un modèle géologique 3D du secteur Montpellier-Sète et de l'étang de Thau (34)*. Livrable L4. RP-70789-FR. <https://ficheinfoterre.brgm.fr/document/RP-70789-FR>.
- Ladouche, B., Dewandel, B., Lamotte, C., Pezard, P., & Séranne, M.** (2022) - *Plateforme DEM'Eaux Thau - 1ères acquisitions sur la source de la Vise, forages DEMENT1, DEMENT2, DEMENT3, DEMENT4*. Livrable L10 - RP-70842-FR. <https://ficheinfoterre.brgm.fr/document/RP-70842-FR>.
- Lamotte, C.** (2019) - *Projet DEM'Eaux-Thau - Instrumentation de la source de la Vise à Balaruc-Les-Bains (34)*. Livrable L7 - RP-69163-FR. <https://ficheinfoterre.brgm.fr/document/RP-69163-FR>.
- Marchal, J. P., & Camus, A.** (1986) - *Ressources en eau souterraine des systèmes aquifères calcaires Jurassiques de l'étang de Thau (Hérault) - Rapport BRGM 86-SGN-684-LRO*.
- Marchal, J. P., Carlier, P., & Oudin, Y.** (1990) - *Modélisation de l'aquifère karstique de l'étang de Thau. Actualisation des données hydrogéologiques, recalage du modèle, simulations complémentaires*.
- Maréchal, J.-C., Ladouche, B., Hakoun, V., Dewandel, B., Perrochet, P., & Lamotte, C.** (2022) - *Inversac de la source sous-marine de la Vise sous la lagune de Thau : mécanisme et modélisation*. RP-70839-FR.
- Ranchoux, C., Ladouche, B., de Montety, V., Seidel, J. L., Pétré, M. A., Hery, M., Desoeuvre, A., & Batiot-Guilhe, C.** (2022) - *DEM'Eaux Thau- Rapport d'analyses géochimiques- Apports des campagnes spatiales 2018-2019 - Livrable L5a*. Rapport RP-71281-FR. <https://ficheinfoterre.brgm.fr/document/RP-71281-FR>.
- Thiery, D.** (2014) - *Logiciel GARDENIA version 8.2. Guide d'utilisation*. BRGM RP-62797-FR. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-62797-FR.pdf>.
- Thiéry, D.** (1990) - *Software MARTHE. Modelling of Aquifers with a Rectangular Grid in Transient state for Hydrodynamic calculations of Heads and flows. Release 4.3*. RP-32548-FR. <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RR-32548-FR.pdf>.

Thiéry, D. (2015) - *Modélisation 3D des écoulements en Zone Non Saturée avec le code de calcul MARTHE - version 7.5. Rapport BRGM/RP-64495-FR. 87p., 36 fig.* <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-64495-FR.pdf>.

Vigouroux, P., Marchal, J.-P., Le Strat, P., & Tissier, G. (2008). *Calcaires jurassiques pli ouest de Montpellier et massif de la Gardiole. Etat des lieux hydrogéologique. RP-56503-FR.* <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-56503-FR.pdf>.

Annexe 1

Détail sur le réseau d'observation

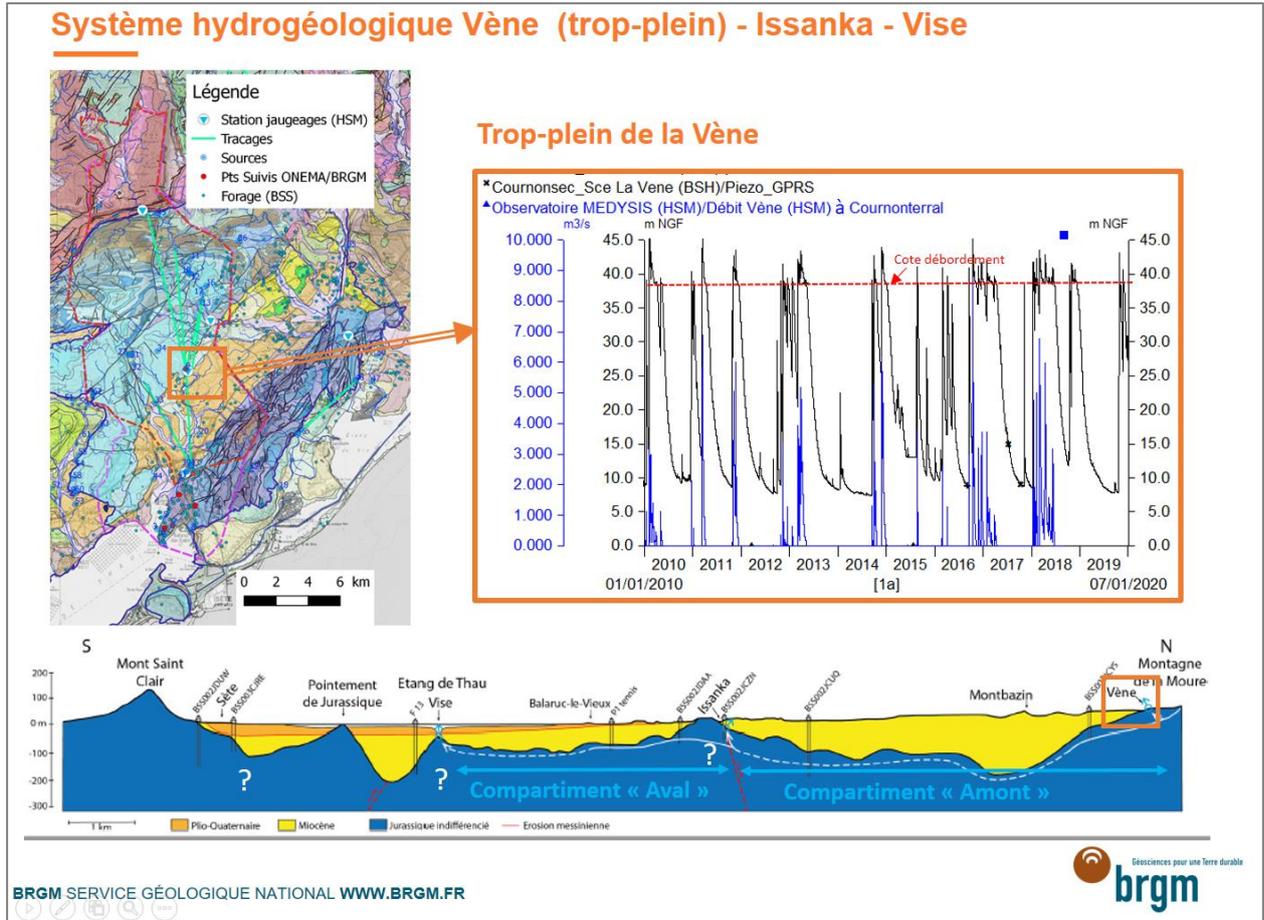


Figure A- 1 : Exemple d'informations disponibles au trop-plein de la Vène (Extrait COSUI 10 Janvier 2020).

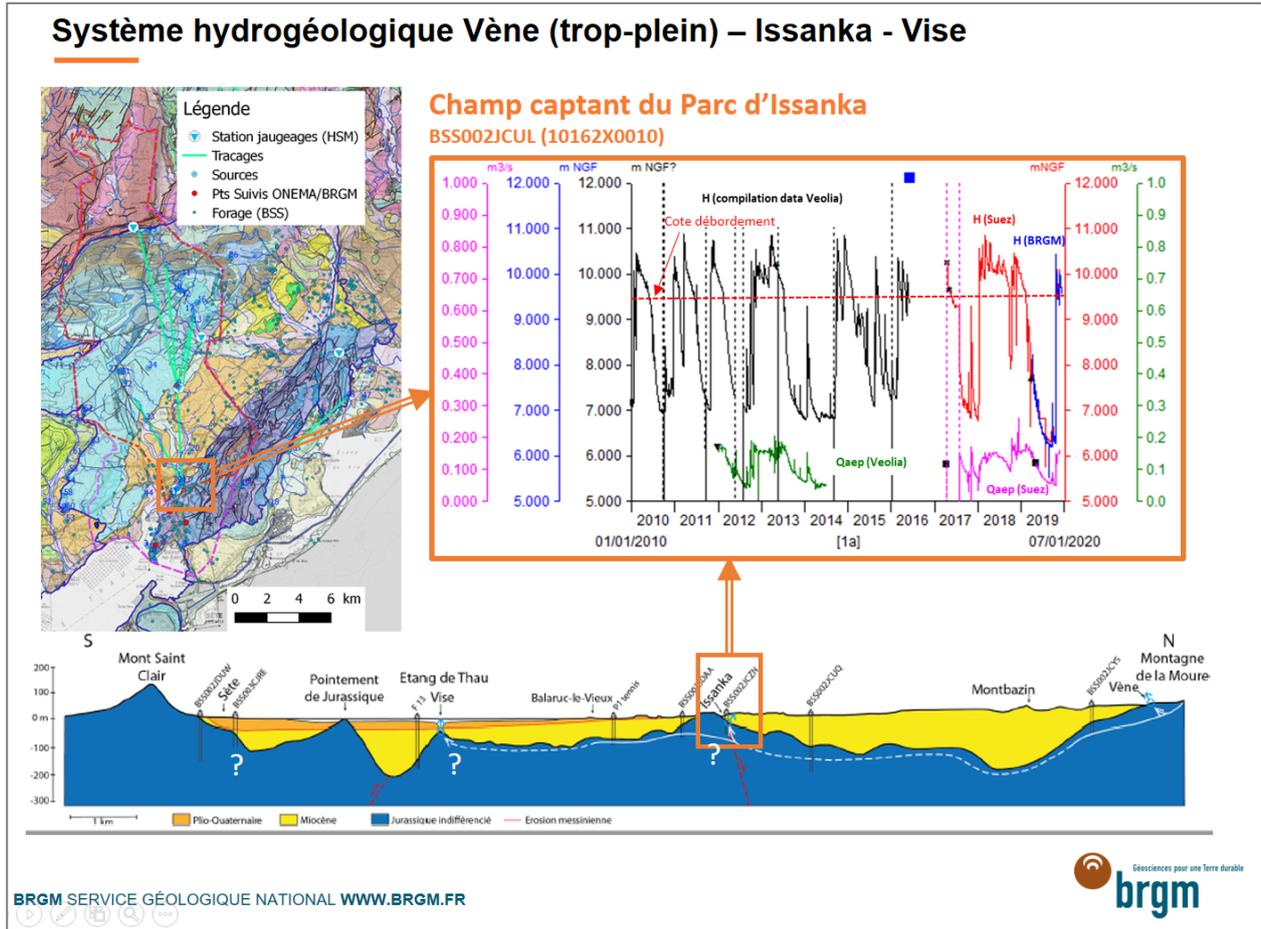


Figure A- 2 : Exemple d'informations disponibles au champ captant d'Issanka (Extrait COSUI 10 Janvier 2020).

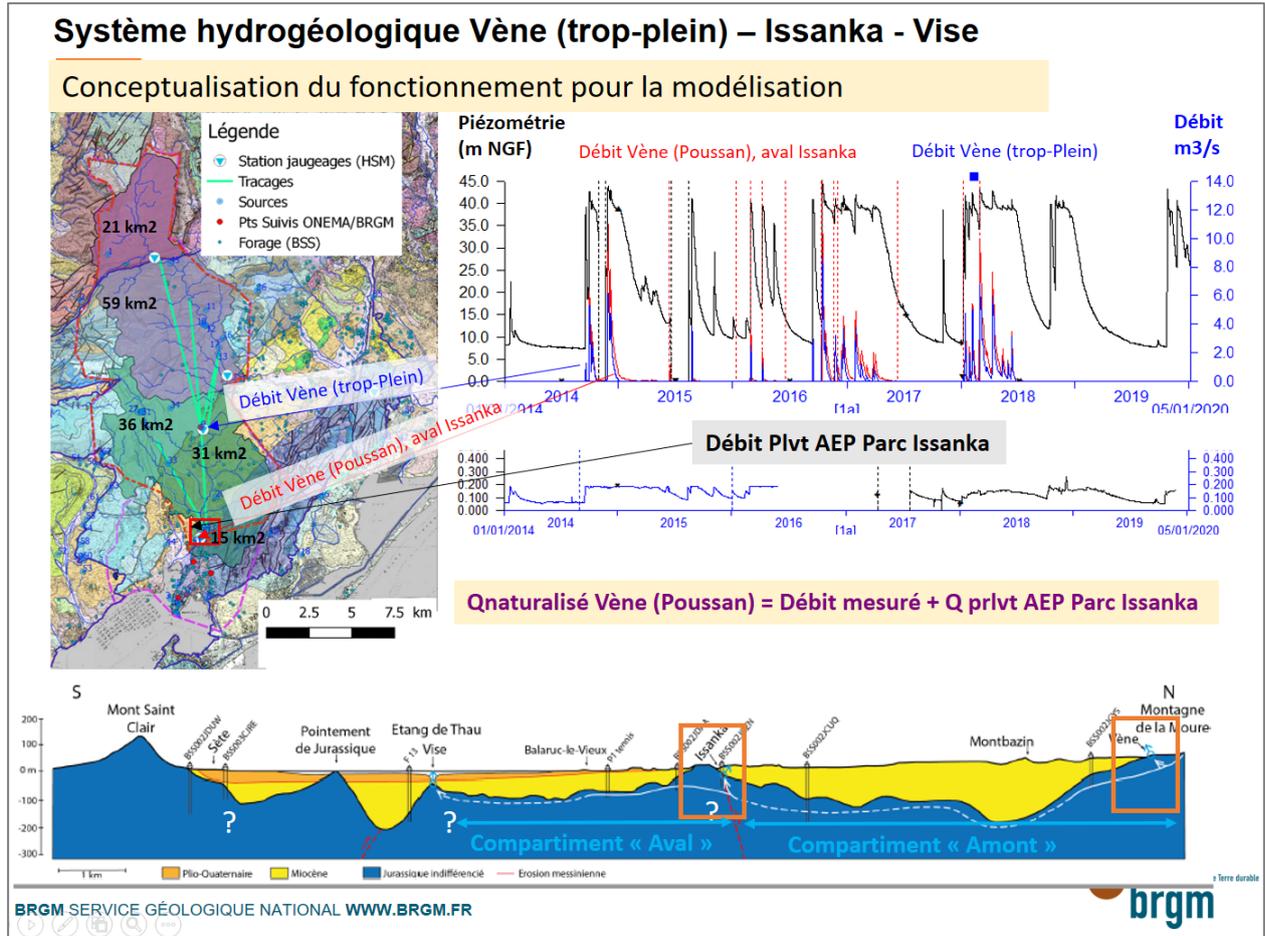


Figure A- 3 : Évolution des débits et de la piézométrie du trop-plein de la Vène, évolution du débit de la Vène à Poussan (aval Issanka) et débit des prélèvements AEP du champ captant d'Issanka. (Extrait COSUI 10 Janvier 2020).

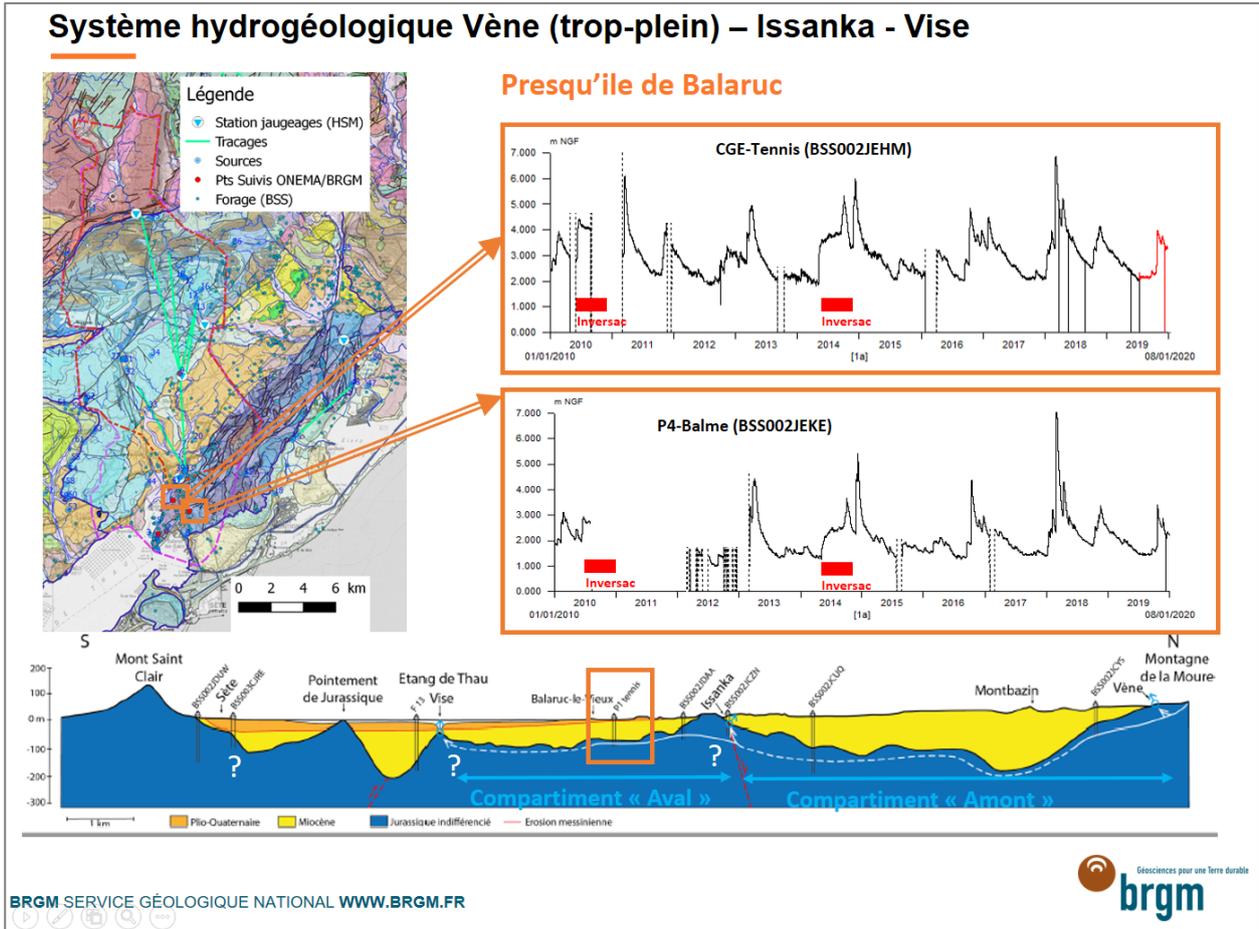


Figure A- 4 : Évolution de la piézométrie mesurée sur les ouvrages de référence du compartiment aval (Extrait COSUI 10 Janvier 2020).

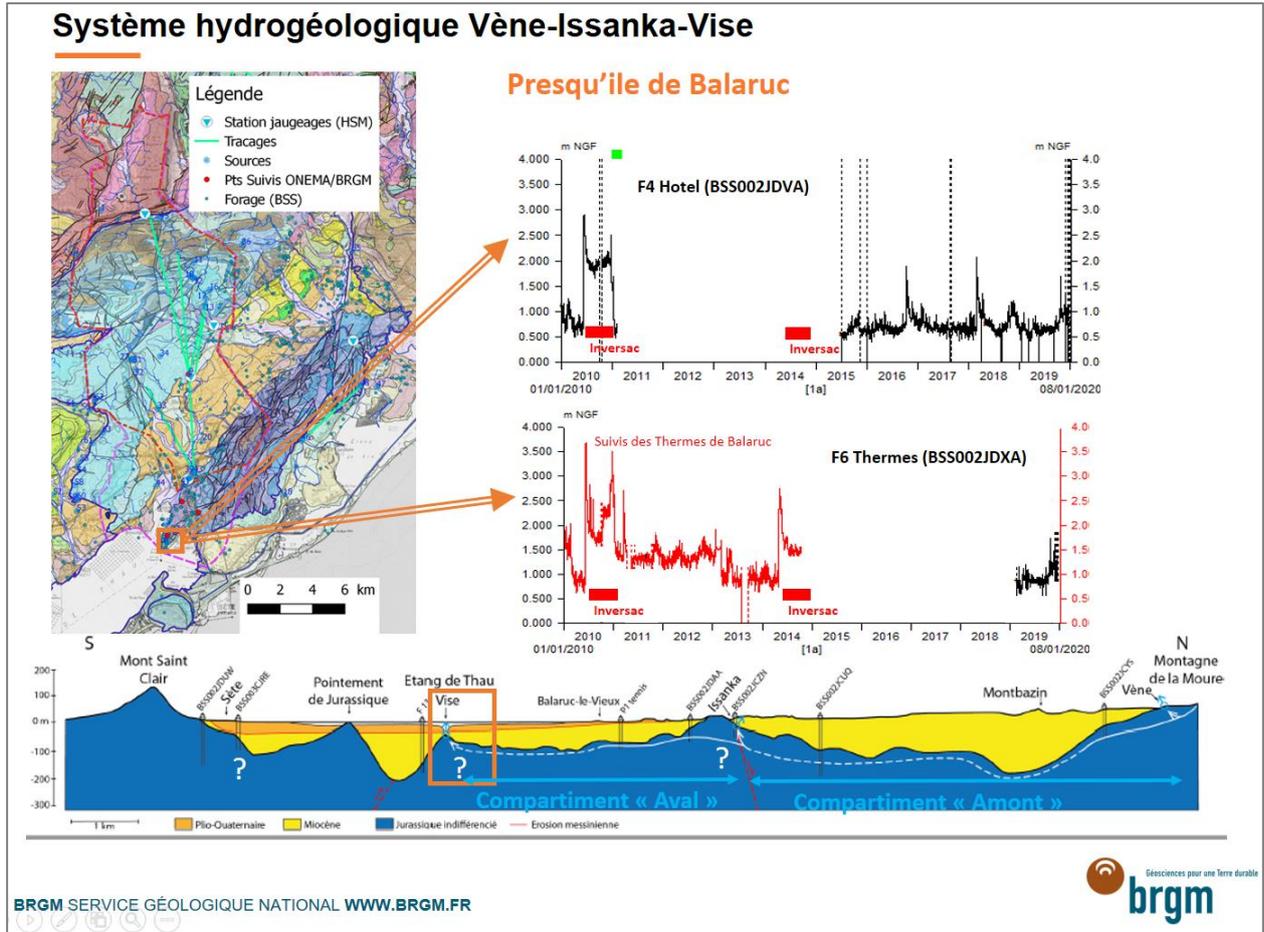


Figure A- 5 : Évolution de la piézométrie mesurée sur les ouvrages de référence de la presqu'île de Balaruc située à moins de 400 m de la source sous-marine de la Vise (Compartiment Aval, Extrait COSUI 10 Janvier 2020).

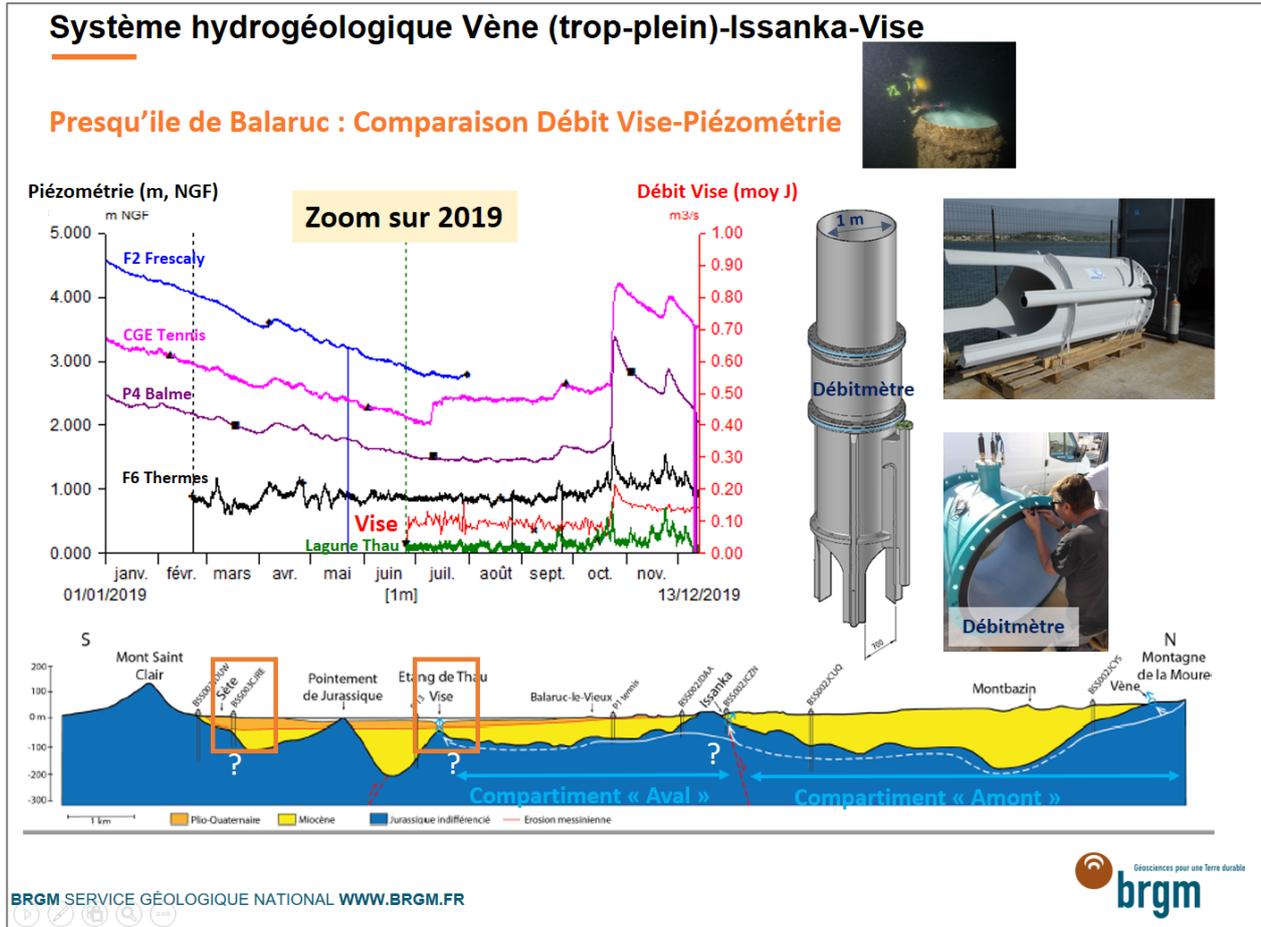


Figure A- 6 : Inter-comparaison de la piézométrie mesurée au sein du « compartiment aval » et comparaison au débit de la source sous-marine de la Vise et au niveau de la lagune de Thau, Extrait COSUI 10 Janvier 2020).

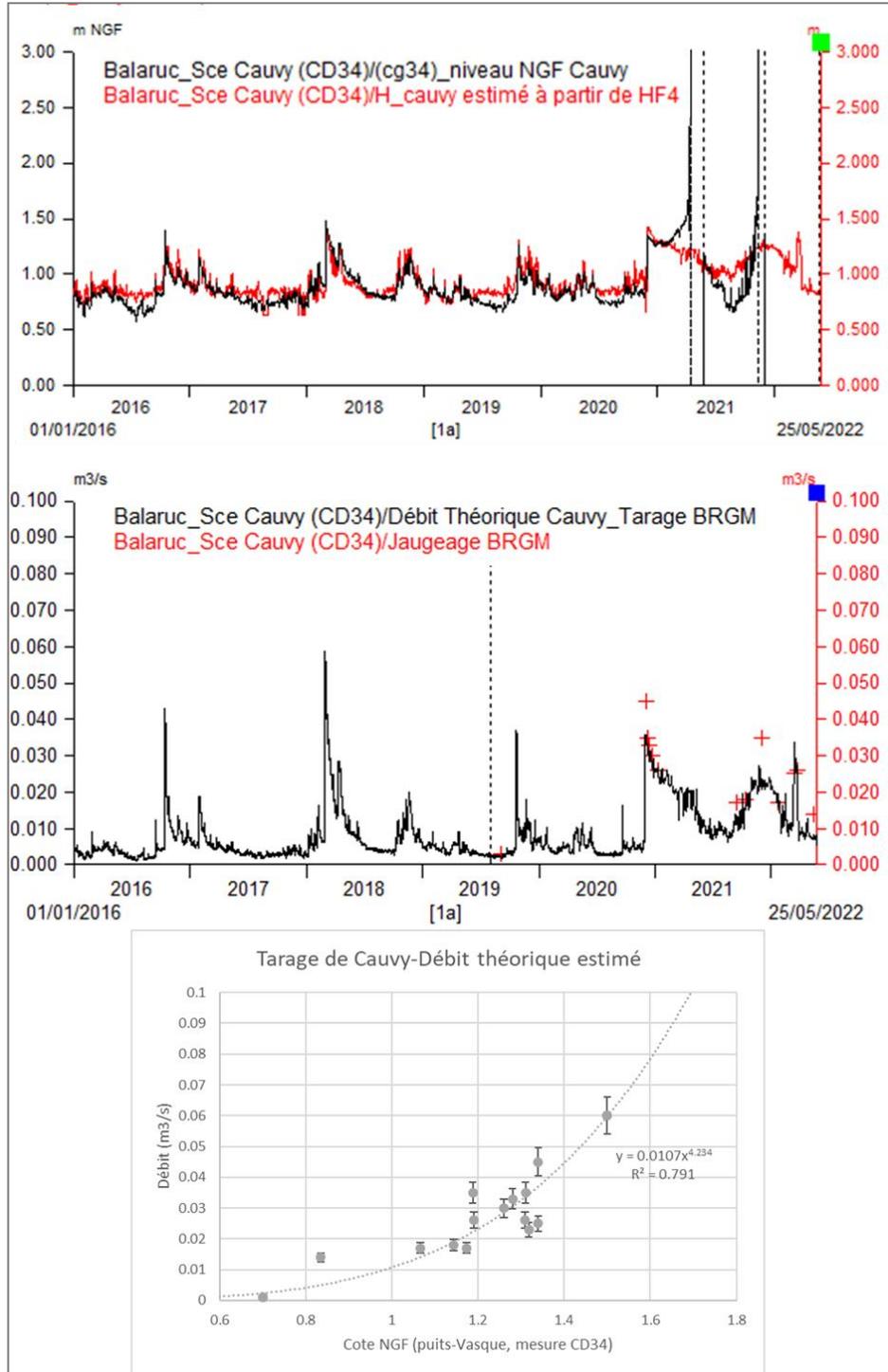


Figure A- 7 : Courbe de tarage de la source de Cavy et évolutions des débits/hauteurs depuis 2016.

FICHE STATION ET DE RECOLLEMENT date: juin 2020			
 réseau hydrologique et hydrogéologique du bassin de Thau			
INFORMATIONS GENERALES			
Noms du site	Source d'Embressac		
Rivière/Etang/Lac/Forage	vasque de la résurgence		
coordonnées	LB-II etendu X:710385 Y:1827740		
Route			
Commune	Balaruc les Bains		
Département	Hérault		
Parcelle-propriétaire	Préseident electronics		
convention	oui signé avec président		
INTERVENANT PROJET			
Maitre d'ouvrage		contact	cesmat ludovic-
		email-tél	l.cesmat@smbt.fr 04 99 04 72 07
		adresse	
LOCALISATION DE LA STATION			
Vasque de résurgence de la source (à gauche) et intérieur du local technique et positionnement du matériel (à droite)			
			
IMPLANTATION de l'échelle			
			
		échelle limni	
		seuil déversoir de la vasque vers un deuxième bassin	
		Déversoir N-2, vers le fossé et port suttel	

Figure A- 8 : Source d'Ambressac, extrait de la fiche de recollement de la station (SMBT).

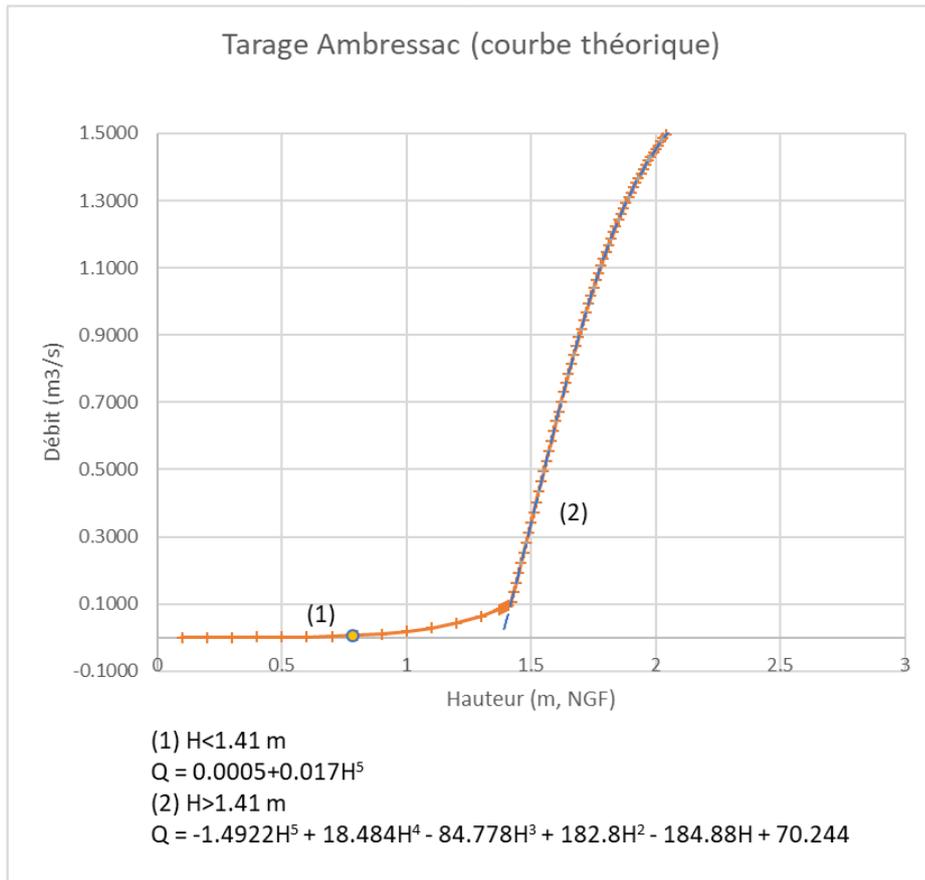
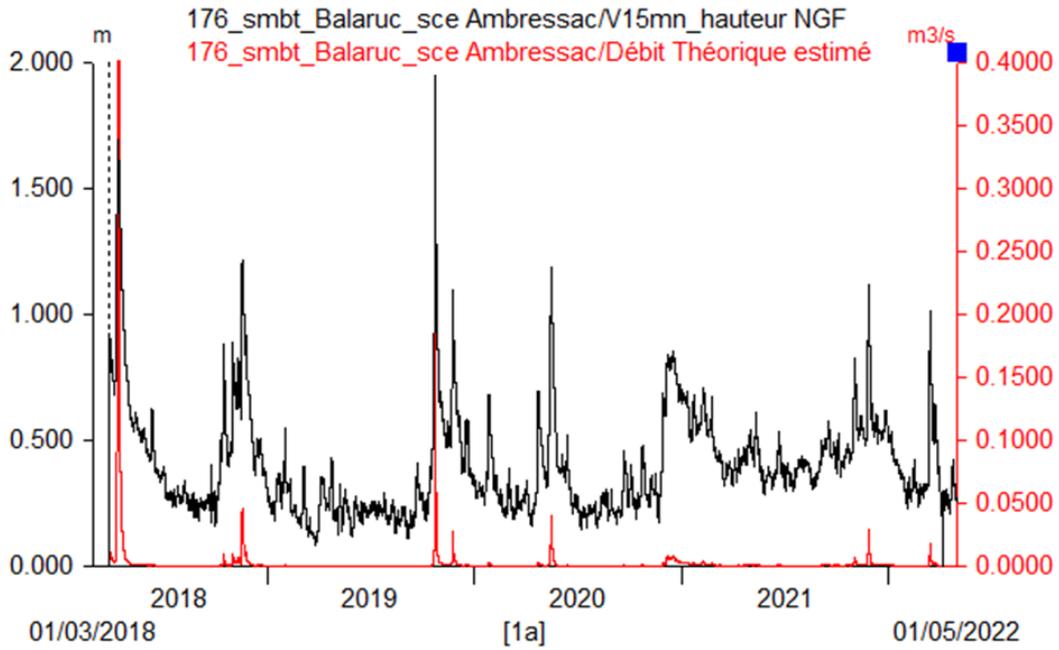


Figure A- 9 : Courbe de tarage de la source de d'Ambressac et évolutions des débits/hauteurs depuis 2018.

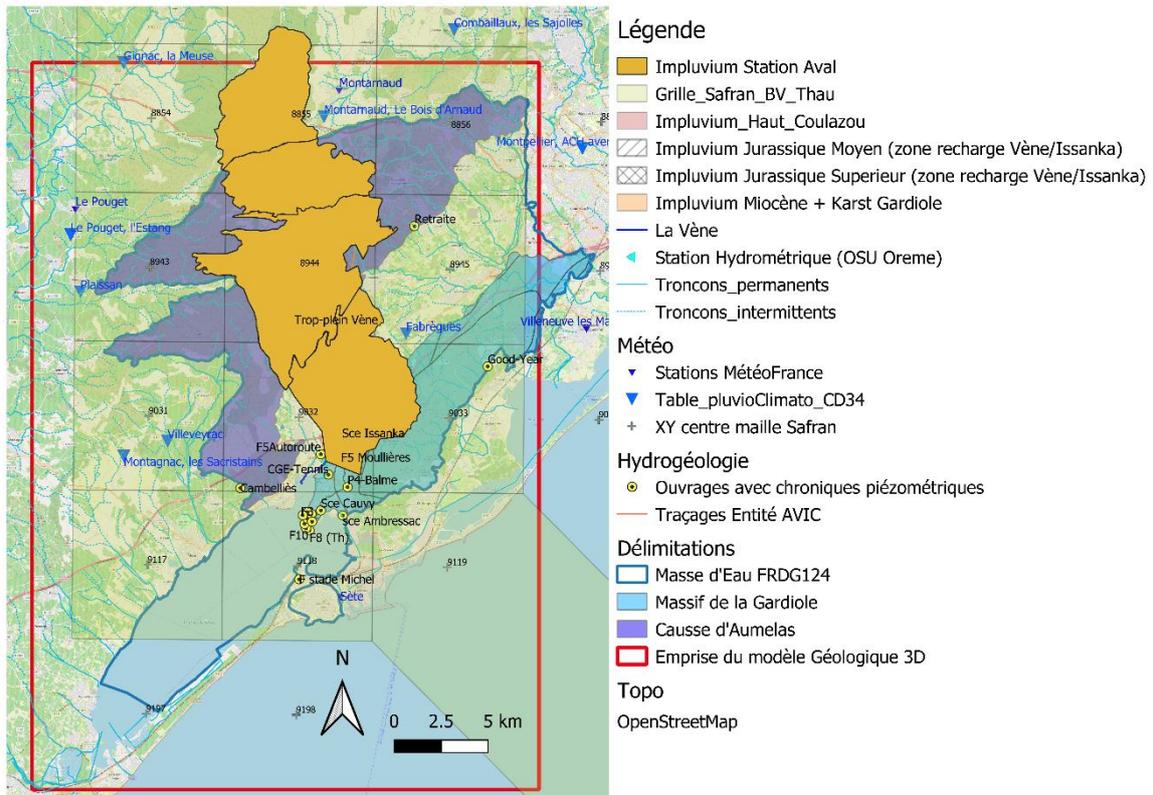


Figure A- 10 : Emprise des mailles Safran sur la zone d'étude.

Annexe 2

Éléments complémentaires de la modélisation GARDENIA

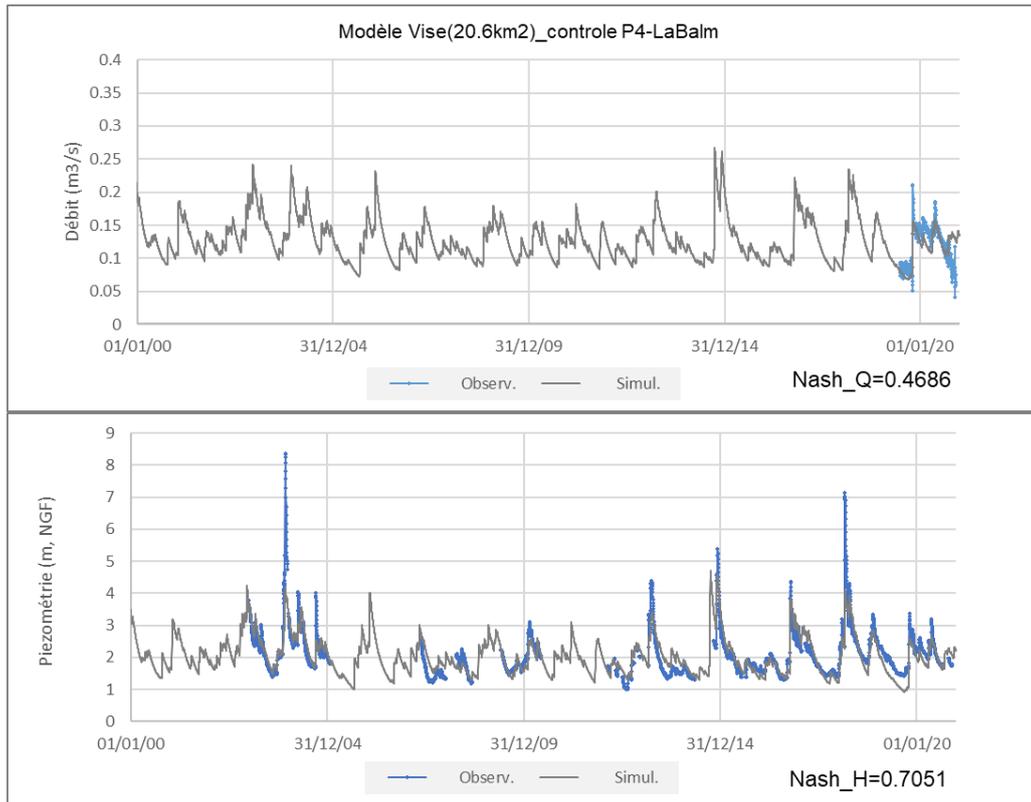


Figure A- 11 : Résultats de simulation du modèle GARDENIA Vise_P4-LaBalm.

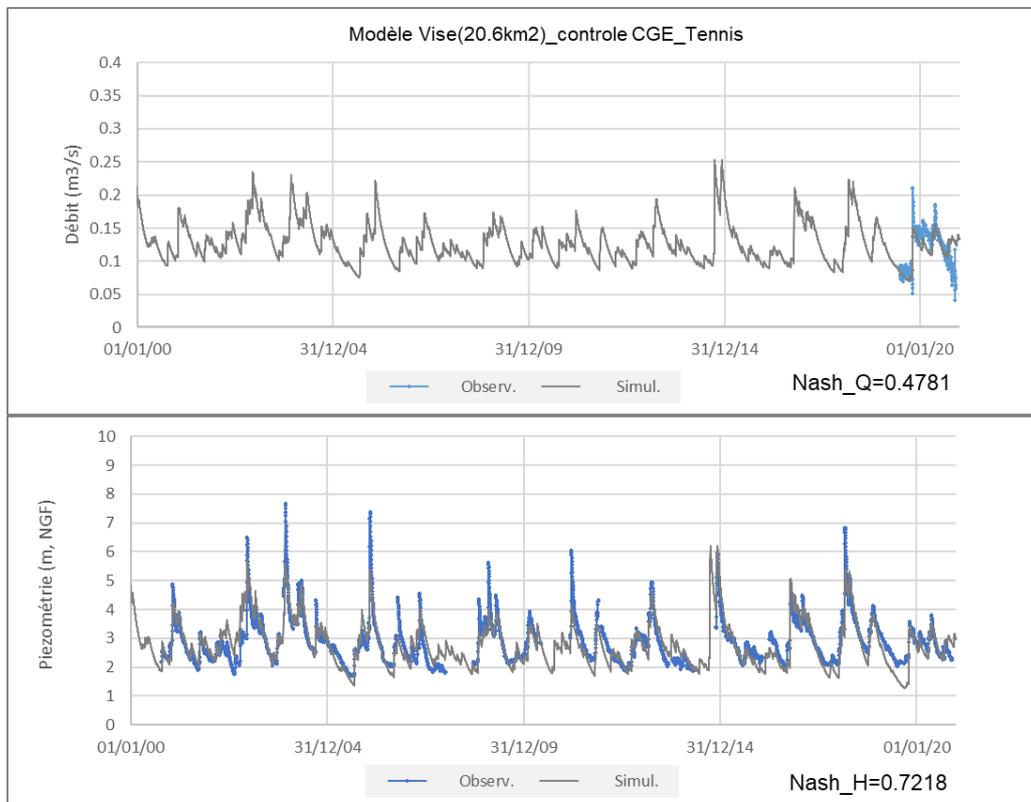


Figure A- 12 : Résultats de simulation du modèle GARDENIA Vise_CGE-Tennis.

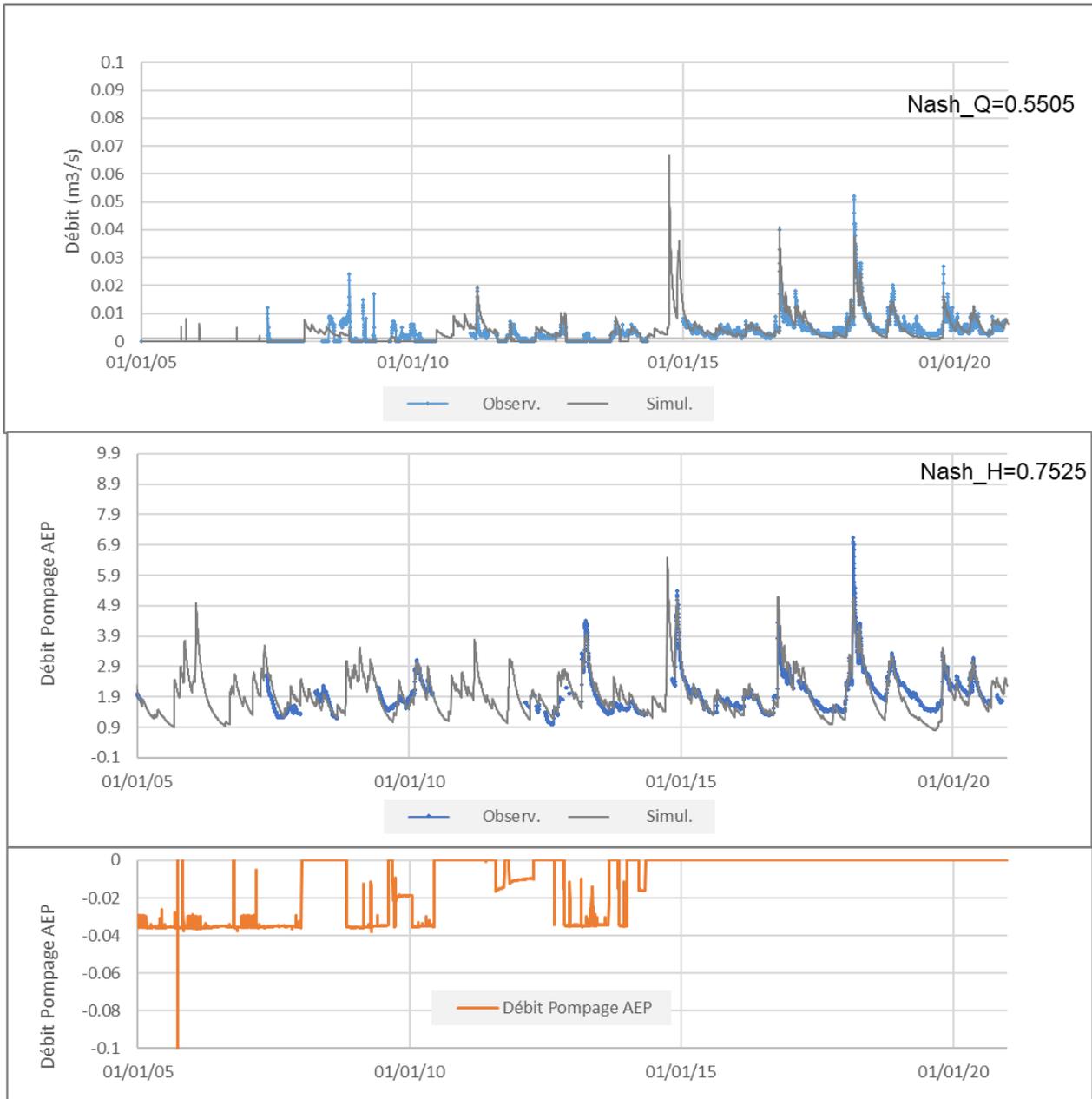


Figure A- 13 : Résultats de simulation du modèle GARDENIA Cauvy.

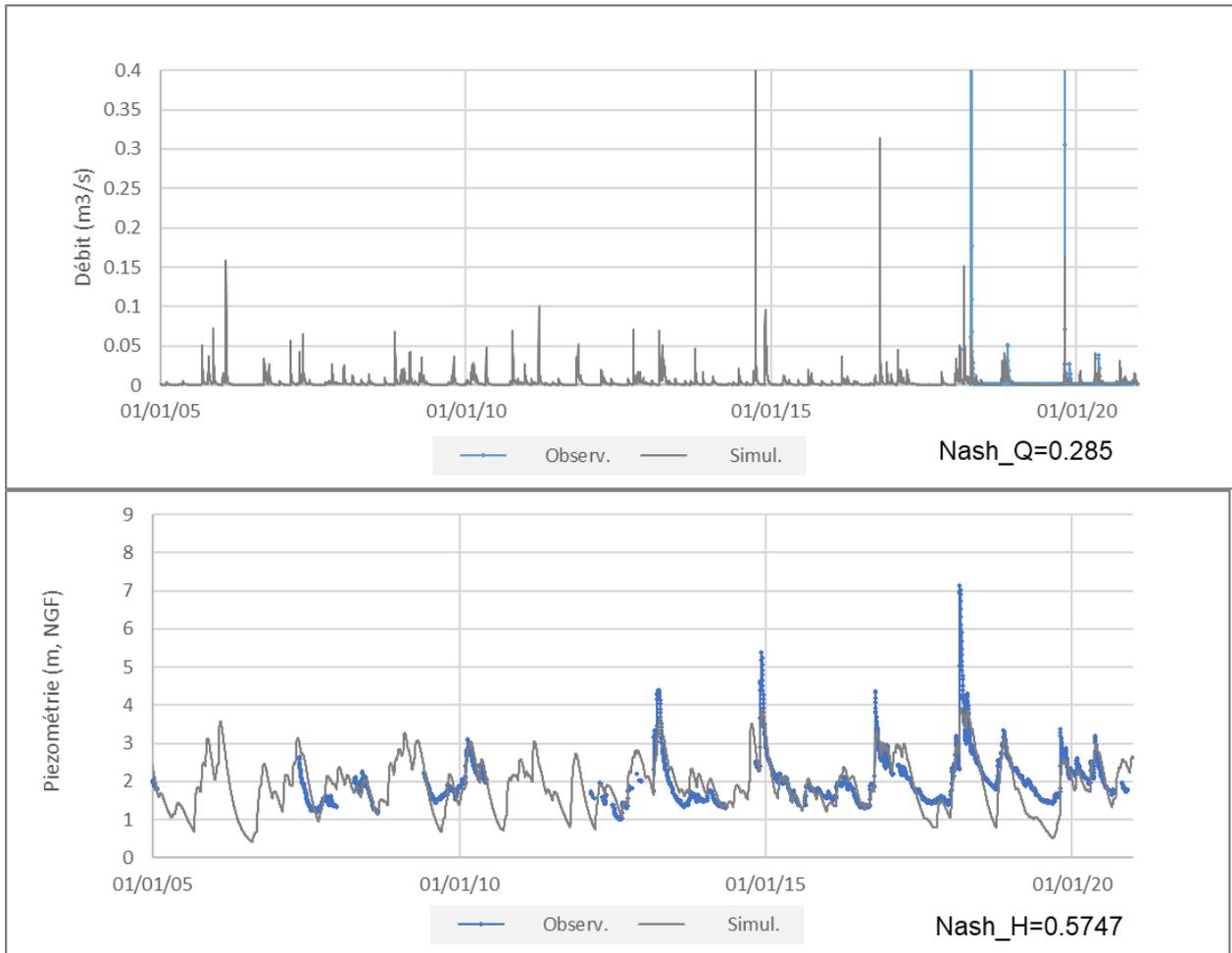


Figure A- 14 : Résultats de simulation du modèle GARDENIA Ambressac.

	Superficie	Niv. Base	Coef Emmag	Rui Perco	T1/2 Perco	T1/2 Taxis1	Nash_Q	Nash_H
	km2	m		mm	mois	mois		
Remarque paramètre		Fixé						
Modèle Cauvy P4Balm_0.3m_pompageAEP	0.5093	0.3	7.34E-03	17.0	12.30	2.90E-02	0.55	0.76
Modèle GARDENIA_P4Balm	0.3556	0.1	0.1048	1.0	6.14	9.11E-01	0.29	0.61

Figure A- 15 : Paramètres de modèle Cauvy et Ambressac.

Annexe 3

Statistiques des couches du modèle MARTHE

Ecoulement	Couche	# Mailles	Epaisseur (m)				
			Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart-type	
non		4	1737	836.4	2.0	2709.6	766.2
oui		5	1035	250.3	0.7	1020.3	168.8
		6	1688	479.5	7.7	992.4	175.0
non		7	2106	431.6	0.04	2220.1	485.9
oui		8	2386	372.0	0.6	1209.1	207.2
		9	3259	573.9	0.6	1351.0	176.7

Annexe 4

Sites et observations de références

Col_Lig_Couche ref.MARTHE	Nom ref.MARTHE	X_L93	Y_L93	ref BSS	autre indice BSS	date1	hauteur piezo m NGF	lex_nature	profondeur m
X56_Y18_Z9	JM1	761820	6277279	09906X0002	09906X0002	14/03/1986	47.95	FORAGE	100
X57_Y10_Z9	JM2	762385	6280486	09906X0041	09906X0041	26/08/1986	56	FORAGE	141
X56_Y16_Z9	JM3	762037	6278148	09906X0084	09906X0084	14/03/1986	51.2	FORAGE	55
X50_Y20_Z9	JM4	759483	6276477	09906X0097	09906X0097	17/03/1986	47.3	FORAGE	140
X49_Y19_Z9	JM5	759015	6276740	09906X0098	09906X0098	17/03/1986	49	FORAGE	122
X55_Y19_Z9	JM7	761567	6276931	09906X0115	09906X0115	02/04/1986	51.72	FORAGE	56
X56_Y8_Z9	JM8	761989	6281050	09906X0130	09906X0125	26/08/1986	56.78	FORAGE	90
X58_Y6_Z9	JM9	762617	6282045	09906X0126	09906X0126	25/08/1986	51.69	FORAGE	130
X42_Y19_Z9	JM10	756385	6276861	09906X0165	09906X0165	25/08/1986	55.12	SOURCE	0
X59_Y12_Z9	JM11	763037	6279451	09906X0130	09906X0125	26/08/1986	56.78	FORAGE	90
X61_Y6_Z9	JM12	763917	6282015	09907X0287	09907X0287	25/08/1986	105.89	FORAGE	0
X9_Y29_Z9	JM13	743376	6272630	10154X0076	10154X0076	15/09/1986	49.12	FORAGE	150
X21_Y28_Z9	JM14	748001	6273382	10154X0080	10154X0078	pas de date	61	FORAGE	310
X22_Y28_Z9	JM16	748493	6273220	10161X0171	10161X0171	01/04/1986	68.86	FORAGE	350
X53_Y50_Z9	JM17	760690	6264202	10162X0146	10162X0127	09/06/1986	1.62	FORAGE	160
X53_Y34_Z9	JM18	760760	6270734	10162X0135	10162X0174	12/05/1986	46.6	FORAGE	30
X37_Y26_Z8	JS1	754553	6274163	09905X0051	09905X0051	28/03/1986	42.5	FORAGE	160
X36_Y26_Z8	JS2	753891	6273888	09905X0052	09905X0052	28/03/1986	50.3	FORAGE	194
X45_Y25_Z8	JS4	757539	6274442	09906X0015	09906X0015	01/05/1986	29	CAVITE- NATURELLE	0
X44_Y21_Z8	JS5	757229	6276134	09906X0013	09906X0035	26/08/1986	45.45	CAVITE- NATURELLE	0
X20_Y51_Z8	JS6	747434	6264185	10154X0038	10154X0038	06/03/1986	41.54	SONDAGE	373.8
X19_Y48_Z8	JS7	747370	6265084	10154X0087	10154X0087	05/09/1986	26.93	SOURCE	0
X8_Y47_Z8	JS9	742808	6265469	10154X0090	10154X0090	06/03/1986	18.34	FORAGE	36.75
X22_Y39_Z8	JS10	748287	6268604	10154X0092	10154X0092	06/03/1986	57.23	SONDAGE	265.6

X21_Y39_Z8	JS11	748188	6268755	10154X0093	10154X0093	06/03/1986	69.55	SONDAGE	189.2
X21_Y39_Z8	JS12	748189	6268830	10154X0094	10154X0094	06/03/1986	67.35	SONDAGE	145.9
X20_Y54_Z8	JS13	747576	6262639	10158X0015	10158X0015	06/03/1986	-32.08	FORAGE	219
X19_Y54_Z8	JS14	747174	6262613	10158X0018	10158X0018	06/03/1986	-24.97	SONDAGE	299.5
X21_Y56_Z8	JS15	747829	6261957	10158X0051	10158X0051	06/03/1986	-61.2	SONDAGE	199.7
X24_Y49_Z8	JS16	749129	6264921	10161X0061	10161X0061	15/05/1986	36.72	SONDAGE	51.75
				10161X0187	10161X0091	21/04/1986	33.72	EXCAVATION- CIEL-OUVERT	5
X32_Y49_Z8	JS17	752259	6264696						
X32_Y31_Z8	JS18	752426	6272039	10161X0205	10161X0153	28/08/1986	184.27	FORAGE	187
X23_Y50_Z8	JS19	748974	6264222	10161X0159	10161X0159	28/04/1986	38.9	FORAGE	70
X38_Y38_Z8	JS20	754845	6269249	10161X0160	10161X0160	01/04/1986	47.6	FORAGE	92
X33_Y47_Z8	JS21	752747	6265743	10161X0196	10161X0163	29/08/1986	68.25	FORAGE	118
X31_Y41_Z8	JS22	751825	6268072	10161X0167	10161X0167	06/03/1986	41.89	FORAGE	98.1
X33_Y50_Z8	JS23	752916	6264251	10161X0202	10161X0202	29/04/1986	6.33	FORAGE	94
X48_Y29_Z8	JS24	758964	6272769	10162X0007	10162X0007	28/03/1986	45.52	SONDAGE	0
X56_Y33_Z8	JS25	761854	6271246	10162X0009	10162X0009	12/05/1986	29	FORAGE	148
X42_Y47_Z8	JS26	756289	6265686	10162X0019	10162X0019	10/10/1986	8.81	FORAGE	200
X43_Y30_Z8	JS27	756871	6272465	10162X0074	10162X0074	29/08/1986	21.57	FORAGE	64
X56_Y35_Z8	JS28	761989	6270545	09906X0130	09906X0125	26/08/1986	56.78	FORAGE	90
X43_Y29_Z8	JS29	756603	6272757	10162X0121	10162X0121	10/06/1986	1.62	FORAGE	115
X42_Y49_Z8	JS30	756555	6264769	10166X0136	10162X0136	18/06/1986	8.46	FORAGE	40.5
X59_Y32_Z8	JS31	763098	6271727	10163X0059	10163X0059	09/09/1986	2	FORAGE	71
X34_Y57_Z8	JS33	753215	6261527	10165X0117	10165X0117	15/03/1986	0.5	FORAGE	0
				10166X0029	10166X0029	12/09/1986	1	CAVITE- NATURELLE	0
X56_Y52_Z8	JS34	761804	6263443						
X53_Y55_Z8	JS35	760996	6262348	10166X0084	10166X0084	09/06/1986	2.11	FORAGE	49

Compilé à partir des observations piézométriques de référence à l'étiage de 1986 (réalisé à partir des indices BSS actuels et des indications fournies par **Marchal & Camus** (1986)).

Code BSS	Commune	Nb Mesures	Début	Fin	Niveau mini	Niveau maxi	X_L93	Y_L93	Col_Lig_Couche MARTHE	Commentaire
10165X0183/F3	Balaruc-les-Bains						754658	6260536	X38_Y60_Z8	F3_(Ex Thermes)
10165X0184/F4	Balaruc-les-Bains	4872	04/06/1996	06/07/2021	0.41	3.11	754868	6260789	X38_Y59_Z8	F4_(Ex Thermes)
10165X0251/F6	Balaruc-les-Bains						754676	6260877	X38_Y59_Z8	F6 (Hespéride)
10166X0252/AMBRES	Balaruc-les-Bains						756539	6260705	X42_Y59_Z8	Source Ambressac
10166X0253/P4	Balaruc-les-Bains	6495	16/09/1999	05/07/2021	1.02	8.95	756846	6262232	X43_Y55_Z8	P4-Balme
10166X0212/BV83	Balaruc-le-Vieux	7300	30/06/1997	06/07/2021	1.66	8.59	755777	6262898	X40_Y54_Z8	CGE_Tennis
0162X0194/BV39	Balaruc-le-Vieux						756045	6263857	X41_Y51_Z8	F2 Frescaly
10162X0196/BV46	Balaruc-le-Vieux						756442	6264094	X42_Y51_Z8	F5_Mouillère Basses
10162X0226/V	Cournonsec	7866	04/09/1969	06/07/2021	4.09	47.13	756188	6270819	X41_Y34_Z8	Trop-Plein Vène
09905X0051/CORNEC	Cournonterral	694	13/04/1999	10/03/2001	28.95	40.65	754553	6274163	X37_Y26_Z8	Karst libre Aumelas
10162X0019/CGE	Gigean	2464	06/03/1987	03/09/2007	0	28.41	756289	6265686	X42_Y47_Z8	SS couv. bassin Gigean
10163X0039/TROU	Mireval	177	29/10/1974	07/04/1978	3.05	5.81	764297	6268806	X62_Y39_Z8	
10163X0103/S8	Mireval						766197	6269739	X66_Y37_Z8	
10163X0156/SG	Mireval						764266	6268706	X62_Y39_Z8	
09906X0149/TOUAT	Pignan	2683	15/12/2003	31/12/2012	29.37	53.58	761921	6277358	X56_Y18_Z9	Karst libre Aumelas
09906X0161/PZ1	Pignan	5991	16/12/2003	06/07/2021	25.62	57.08	760362	6276230	X52_Y20_Z9	Maison de retraite
10162X0010/ISKA	Poussan	1467	20/02/1987	01/10/1998	3.51	11.3	756521	6264720	X42_Y49_Z8	Issanka (Pavillon)
10161X0226/BV146	Poussan	4965	03/02/1992	10/07/2021	0	7.324	755375	6263992	X39_Y51_Z8	F5autoroute Karst SS couv.
10163X0069/MEXIC	Vic-la-gardiole						763475	6267402	X60_Y42_Z8	
10161X0156/P4	Villeveyrac	802	27/10/1970	30/11/1999	19.84	61.53	749118	6268593	X24_Y40_Z8	

Points de suivis où sont disponibles des séries d'observations de piézométrie et / ou de débit dans l'emprise du modèle MARTHE.

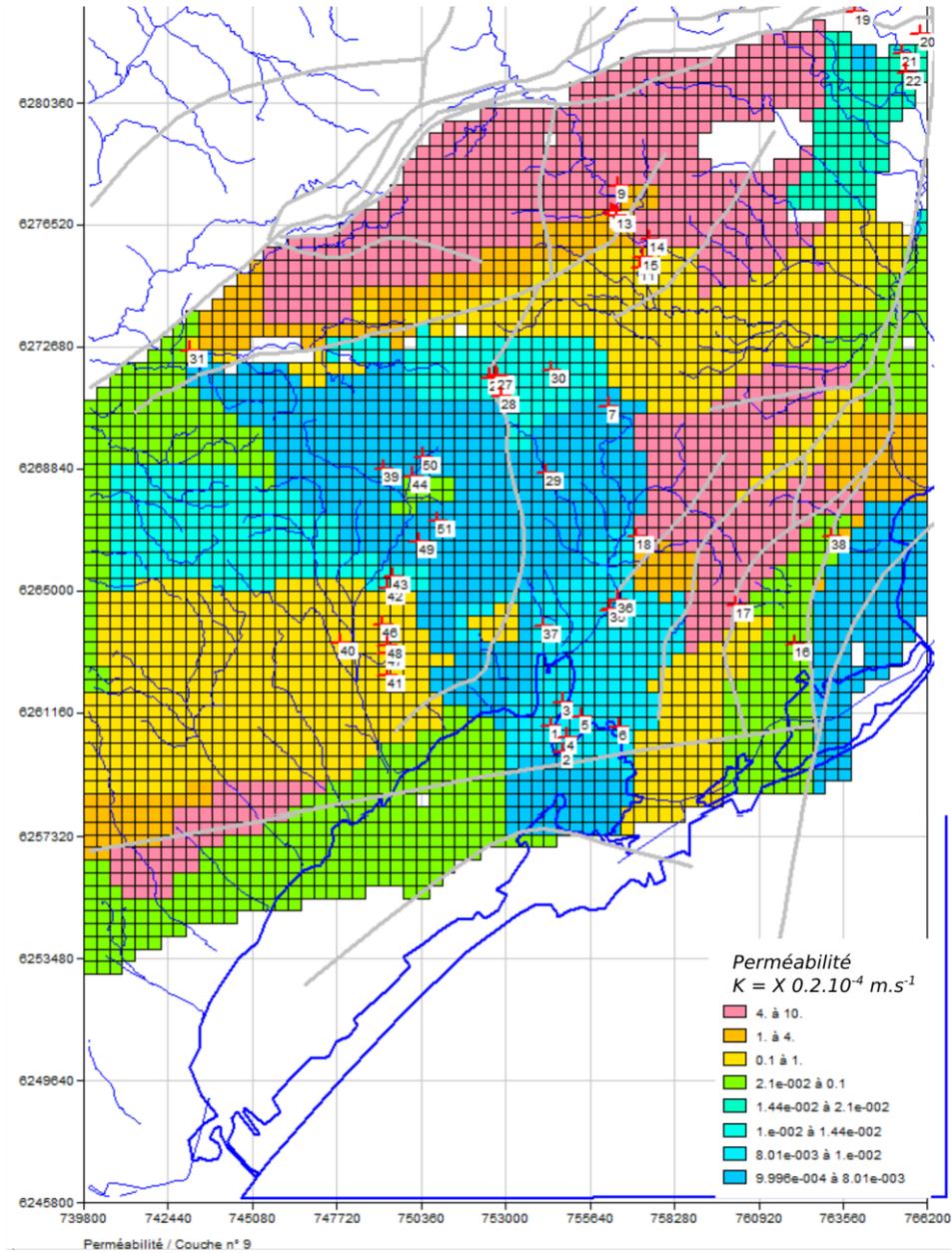
Annexe 5

Principaux prélèvements sur le territoire

ref_BSS	ref_BSS_old	ref_ADES	Nom	XL93	YL93	Commune	p (m)	XL93 modele	YL93 modele	Col modele	Lig modele	Couche modele	ID modele	Entité AVIC
BSS002JAWS	10154X0081/F	10154X0081/F	MasLunes	746799	6272863	Aumelas	125	746799	6272863	18	29	9	1	non
BSS002JCLU	10161X0171/BARRAL	10161X0171/BARRAL	MasBarral	748493	6273220	Aumelas	350	748493	6273220	22	28	9	2	non
BSS002JCSX	10161X4001	10161X4001	Sainton	751227	6273609	Aumelas	275	751227	6273609	29	27	9	3	oui
BSS002GNZB	09905X0056/ARTAMO	09905X0056/ARTAMO	Artamon	750057	6273618	Aumelas	430	750057	6273618	26	27	9	4	oui
BSS002JAWQ	10154X0078	10154X0078	Valloussiere	748001	6273382	Aumelas	310	748001	6273382	21	28	9	5	non
BSS003CJPQ	10165X0195	FRBSS003CJPQ/X	S12	754901	6260388	Balaruc-Les-Bains	50.5	754901	6260388	38	60	8	6	non
BSS002JDWL	10165X0237/ROMAIN	10165X0237/ROMAIN	SceRomaine	754927	6260374	Balaruc-Les-Bains	0	754927	6260374	38	60	8	7	oui
BSS003CJPQ	10165X0195	FRBSS003CJPQ/X	S22	754901	6260388	Balaruc-Les-Bains	0	754901	6260388	38	60	8	8	oui
BSS002JDXJ	10165X0259/F2	10165X0259/F2	F2	754773	6260483	Balaruc-Les-Bains	150	754773	6260483	38	60	8	9	oui
BSS002JDUZ	10165X0183/F3	10165X0183/F3	F3	754658	6260536	Balaruc-Les-Bains	175	754658	6260536	38	60	8	10	oui
BSS002JDVA	10165X0184/F4	10165X0184	F4	754868	6260789	Balaruc-Les-Bains	55	754868	6260789	38	59	8	11	oui
BSS002JDVB	10165X0185/F5	10165X0185/F5	F5	754589	6260576	Balaruc-Les-Bains	105	754589	6260576	37	60	8	12	oui
BSS002JDXA	10165X0251/F6	10165X0251/F6	F6	754676	6260877	Balaruc-Les-Bains	55	754676	6260877	38	59	8	13	oui
BSS002JDWH	10165X0234/SNTCLR	10165X0234/SNTCLR	F8	754773	6259905	Balaruc-Les-Bains	407	754773	6259905	38	61	8	14	oui
BSS002JDXB	10165X0252/F9	10165X0252/F9	F9	754588	6260575	Balaruc-Les-Bains	120	754588	6260575	37	60	8	15	oui
BSS002JDXG	10165X0257/F14	10165X0257/F14	F14	754506	6260253	Balaruc-Les-Bains	303	754506	6260253	37	60	8	16	oui
BSS002JDXC	10165X0253/F9BIS	10165X0253/F9BIS	F9b	754614	6260451	Balaruc-Les-Bains	121	754614	6260451	38	60	8	17	oui
BSS002JDNJ	10165X0021/CAUVY	10165X0021/CAUVY	Cauvy	755378	6260974	Balaruc-Les-Bains	0	755378	6260974	39	59	8	18	oui
BSS002JEKD	10166X0252/AMBRES	10166X0252/AMBRES	Ambressac	756539	6260705	Balaruc-Les-Bains	0	756539	6260705	42	59	8	19	oui
Inconnu	Inconnu	Inconnu	Blanchisserie	754840	6260602	Balaruc-Les-Bains	50	754840	6260602	38	59	8	20	non
BSS002JDDS	10163X0044/F	10163X0044/F	KARLAND	765130	6269220	Mireval	55	765130	6269220	64	38	8	21	non
BSS002GPFH	09906X0149/TOUAT	09906X0149/TOUAT	TOUAT	761921	6277358	Pignan	160	761921	6277358	56	18	9	22	non
BSS002GPFH	09906X0160/BLIDOU	09906X0160/BLIDOU	Boulidou	759834	6275755	Pignan	110	759834	6275755	51	22	9	23	non
BSS002GPFN	09906X0157/FP	09906X0157/FP	Olivet	762375	6278100	Pignan	138	762375	6278100	57	16	9	24	non
BSS002JAWN	10154X0076/MAMERT	10154X0076/MAMERT	StMamert	743376	6272630	Plaissan	150	743376	6272630	9	29	9	25	non
BSS002JCZA	10162X0136	10162X0136	F5	756555	6264769	Poussan	40.5	756555	6264769	42	49	8	26	oui
BSS002JCZN	10162X0184/F7	10162X0184/F7	ISSANKA F7	756296	6264429	Poussan	60	756296	6264429	42	50	8	27	oui
BSS002GPFH	09907X0349/LAUZET	09907X0349/LAUZET	Lauzette	768266	6275049	StJeanDeVedas	60	765551.63	6275170.131	65	23	8	28	non
BSS002JDGR	10163X0157/F1	10163X0157/F1	Fles 1 et 2	768437	6272761	Villeneuve	67	765602.942	6272803.344	65	29	8	29	non
BSS002IDDJ	10163X0036	10163X0036	Remy	767272	6273306	Villeneuve	20.5	765545.2155	6273258.742	65	28	8	30	non
BSS002IDDP	10163X0041	10163X0041	Lafarge	766338	6270211	Villeneuve	123	765577.2858	6270327.519	65	35	8	31	non
BSS002JCLT	10161X0170	10161X0170/FARRIL	Farriol	749368	6266070	Villeveyrac	163.5	749368	6266070	24	46	8	32	non

Annexe 6

Carte des perméabilités – couche 9





**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Direction régionale Occitanie

1039, rue de Pinville
34 000 Montpellier
Tél. : 04 76 15 79 80

www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm